



TUGAS AKHIR - TM145688

**ANALISA PERBANDINGAN PERFORMA TURBIN  
GAS SEBELUM DAN SESUDAH *TURBINE*  
*INSPECTION* DENGAN VARIASI BEBAN DI PLTGU  
BLOK GT 3.2 DAN GT 3.3 PT. PJB UP GRESIK**

**ADITYA RISTANU WIJAYA**  
**NRP 2112 038 020**

Dosen Pembimbing  
**Dedy Zulhidayat Noor, ST, MT, Ph.D**

PROGRAM STUDI DIPLOMA III KERJASAMA PT. PLN (Persero)  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015



FINAL PROJECT - TM145688

# **COMPARISON ANALYSIS OF GAS TURBINE PERFORMANCE BEFORE AND AFTER TURBINE INSPECTION WITH VARIABLY LOAD IN PLTGU BLOCK GT 3.2 AND GT 3.3 PT. PJB UP GRESIK**

**ADITYA RISTANU WIJAYA**  
**NRP 2112 038 020**

Counselor Lecture  
**Dedy Zulhidayat Noor, ST, MT, Ph.D**

DIPLOMA III PT. PLN (Persero) COOPERATIVE PROGRAM  
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Industrial Technology  
Institute Technology of Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015



**ANALISA PERBANDINGAN PERFORMA TURBIN  
GAS SEBELUM DAN SESUDAH *TURBINE*  
INSPECTION DENGAN VARIASI BEBAN DI PLTGU  
BLOK GT 3.2 DAN GT 3.3 PT. PJB UP GRESIK**

**TUGAS AKHIR**


Diajukan Guna Memenuhi Salah Satu Syarat  
Untuk Memperoleh Gelar Ahli Madya Teknik Mesin  
Pada Bidang Studi Konversi Energi  
Program Studi Diploma III Kerjasama PT. PLN (PERSERO)  
Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya

**Oleh :**

**ADITYA RISTANU WIJAYA**

**2112 038 020**

Disetujui Oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir :

  
**Dedy Zulhidayat Noor, ST, MT, PhD**  
**NIP. 19751206 200501 1 002**

**Surabaya, Juni 2015**



# **ANALISA PERBANDINGAN PERFORMA TURBIN GAS SEBELUM DAN SESUDAH *TURBINE* INSPECTION DENGAN VARIASI BEBAN DI PLTGU BLOK GT 3.2 DAN GT 3.3 PT. PJB UP GRESIK**

**Nama Mahasiswa** : Aditya Ristanu Wijaya  
**NRP** : 2112 038 020  
**Jurusan** : D3 Teknik Mesin FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Dedy Zulhidayat Noor, ST, MT, PhD

## **Abstrak**

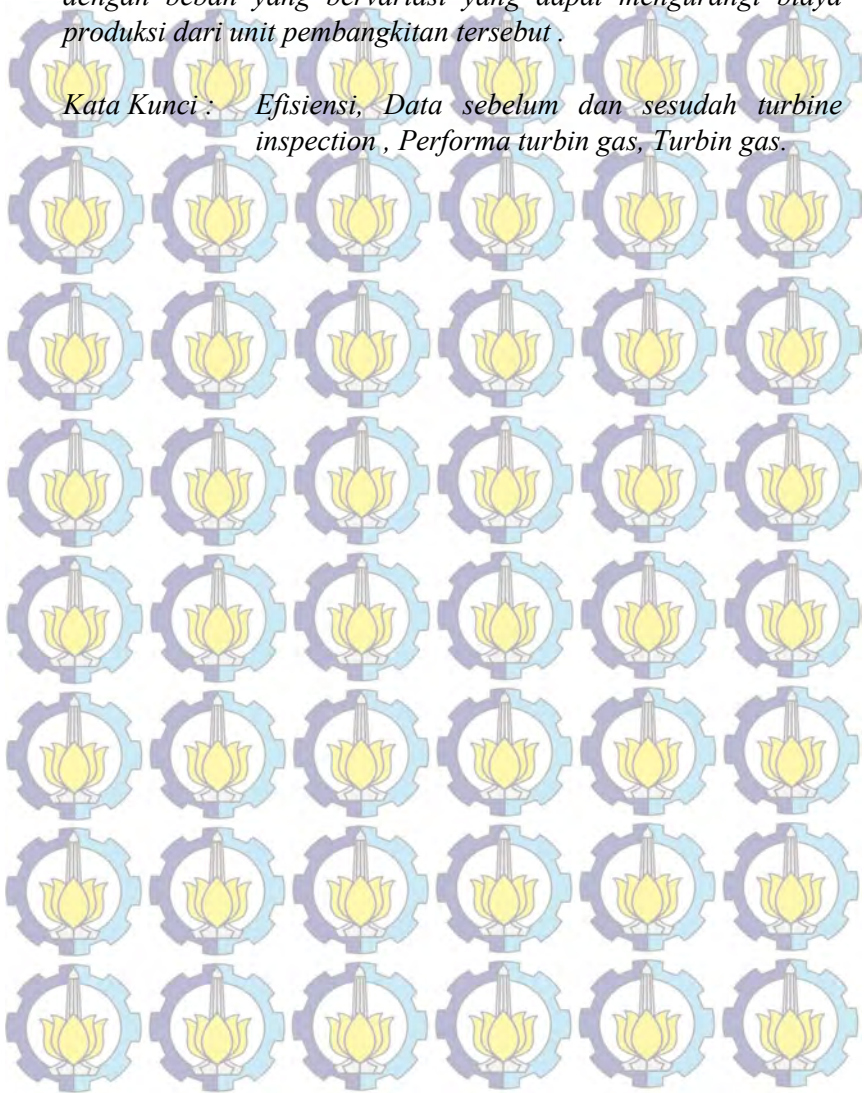
*Pada unit pembangkitan listrik tenaga gas dan uap atau yang biasa dikenal dengan nama PLTGU sering mengalami perubahan beban sesuai dengan kebutuhan listrik yang diminta. Serta jika peralatan pembangkitan tersebut dioperasikan secara terus menerus maka akan mempengaruhi penurunan kehandalan juga performanya. Penurunan performa tersebut akan dapat berdampak langsung pada efisiensi serta biaya operasional yang juga akan bertambah. Maka dari itu, perlu dilakukan sebuah cara yang dapat menjaga performa peralatan tersebut saat pengoperasian unit agar dalam keadaan optimal.*

*Proses turbine inspection merupakan sebuah maintenance yang terjadwal di dalam pengoperasian unit. Hal ini berguna untuk menjaga performa dari turbin gas agar tetap pada performa terbaiknya untuk menunjang kebutuhan energi listrik sekarang. Selanjutnya akan dihitung performa turbin gas blok GT 3.2 dan GT 3.3 pada PLTGU PT. PJB Unit Pembangkitan Gresik dengan membandingkan performa turbin gas sebelum dan sesudah turbin gas dengan beban yang bervariasi. Proses maintenance turbine inspection di dalam turbin gas di PT. PJB Unit Pembangkitan Gresik akan dijelaskan di dalam tugas akhir ini.*

*Setelah dilakukan perhitungan, dapat disimpulkan bahwa turbin gas blok GT 3.2 dan GT 3.3 PT. PJB Unit Pembangkitan Gresik memiliki performa yang lebih baik setelah dilakukan turbine inspection. Performa dari turbin gas tersebut dapat dilihat*

*dari efisiensi yang naik setelah turbin inspection yang akan berpengaruh pada konsumsi bahan bakar yang berkurang saat dengan beban yang bervariasi yang dapat mengurangi biaya produksi dari unit pembangkitan tersebut .*

*Kata Kunci : Efisiensi, Data sebelum dan sesudah turbine inspection , Performa turbin gas, Turbin gas.*





# COMPARISON ANALYSIS OF GAS TURBINE PERFORMANCE BEFORE AND AFTER TURBINE INSPECTION WITH VARIABLY LOAD IN PLTGU BLOCK GT 3.2 AND GT 3.3 PT. PJB UP GRESIK

**Name** : Aditya Ristanu Wijaya  
**NRP** : 2112 038 020  
**Department** : D3 Teknik Mesin FTI-ITS  
**Counselor of Lecture** : Dedy Zulhidayat Noor, ST, MT, PhD

## Abstract

*Gas & Steam Power Plant known as PLTGU, usually had experienced in change of electrical power needed. If these PLTGU has to be operated continuously, it will affect on it's working pressure (pressure drop) and performance also. A decrease in performance will cause bigger operational cost. Therefore, it needs a method to keep PLTGU always on it's peak performance.*

*Turbine Inspection process is a scheduled maintenance program in order to keep PLTGU always on it's best performance. Furthermore, Gas Turbine performance in PLTGU PT. PJB Unit Pembangkitan Gresik will be calculated on GT 3.2 and GT 3.3. Calculation method will be done by comparing gas turbine performance before and after variably loading. Turbine inspection maintenance program will be explained further on this final project.*

*After calculation process, can be drawn a conclusion that Gas Turbine block GT 3.2 and GT 3.3 has a better performance after turbine inspection to be done. Gas turbine performance can be seen from the elevation of efficiency value after turbine inspection. This condition has effected fuel consumption. It shows that fuel consumption is reduced with variably loading. It means that production cost of PT. PJB will be reduced also.*

**Key words :** *Data Before and After Turbine Inspection, Gas Turbine, Efficiency, Gas Turbine Performance.*

## KATA PENGANTAR

Dengan mengucap segala puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan karunia, rahmat dan hidayah- Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul : **ANALISA PERBANDINGAN PERFORMA TURBIN GAS SEBELUM DAN SESUDAH *TURBINE INSPECTION* DENGAN VARIASI BEBAN DI PLTGU BLOK GT 3.2 DAN GT 3.3 PT. PJB UP GRESIK.**

Penyelesaian Tugas Akhir ini merupakan syarat kelulusan akademis dan memperoleh gelar Ahli Madya dalam menempuh pendidikan Bidang Studi Konversi Energi di Program Studi D3 Teknik Mesin Kelas Kerjasama PT. PLN (Persero), Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Terlaksananya dan tersusunnya tugas akhir ini tidak terlepas dari dukungan, bantuan dan kerjasama yang baik dari semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung terlibat di dalam Tugas Akhir ini. Oleh Karena itu pada kesempatan ini, penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Bapak Dedy Zulhidayat Noor, ST MT PhD selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan ilmu, bimbingan, dan bantuan sehingga penulis mampu mengerjakan dan menyelesaikan Tugas Akhir ini. Dan sekaligus sebagai Dosen Wali yang telah memberikan gambaran, motivasi dan bantuan dalam menempuh perkuliahan di Program Studi D3 Teknik Mesin FTI-ITS.
2. Bapak Ir. Suhariyanto, MT selaku Ketua Program Studi D3 Teknik Mesin FTI-ITS.
3. Tim dosen penguji (Bapak Dr.Ir. Heru Mirmanto, MT , Bapak Ir. Denny ME Soedjono, MT dan Bapak Giri Nugroho, ST MSc) yang telah bersedia meluangkan waktu, tenaga dan pikiran dalam rangka perbaikan tugas akhir ini.
4. Ibu Liza Rusdiyana, ST MT selaku koordinator tugas akhir Program Studi D3 Teknik Mesin FTI-ITS.



5. Semua dosen dan karyawan Progam Studi D III Teknik Mesin FTI-ITS.
6. Bapak Purwasito, Mas Danie, Bapak Ali, Bapak Agus Cahyono, Mas Taufiq, Bapak Imam, dan seluruh karyawan dan khususnya staff operasi PLTGU Blok 3 PT. PJB UP Gresik. Terimakasih atas ilmu, bantuan, data, dan bimbingan yang diberikan sehingga penulis dapat terbantu dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
7. Ibu dan Bapak kami tercinta, saudara kami tersayang yang telah memberikan dorongan moril, materil, serta spiritual kepada penulis.
8. Rekan-rekan seperjuangan D III Teknik Mesin FTI-ITS dan semua pihak yang telah membantu terselesaikannya laporan Tugas Akhir ini, kami mengucapkan banyak terima kasih.
9. Serta berbagai pihak yang belum tertulis, tetapi sangat berarti dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Akhirnya semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat untuk sekarang dan masa depan yang akan datang. Penulis menyadari bahwa dalam penulisan laporan ini masih banyak terdapat kekurangan , sehingga saran dan kritik yang membangun mampu menyempurnakan penulisan laporan dimasa yang datang.

Surabaya, Juni 2015

Penulis



## DAFTAR ISI

|  |     |
|--|-----|
| <b>HALAMAN JUDUL</b>                                     | i   |
| <b>TITLE PAGE</b>  | ii  |
| <b>LEMBAR PENGESAHAN</b>                                 | iii |
| <b>ABSTRAK</b>   | iv  |
| <b>ABSTARCT</b>  | vi  |
| <b>KATA PENGANTAR</b>                                    | vii |
| <b>DAFTAR ISI</b>  | ix  |
| <b>DAFTAR GAMBAR</b>                                     | xii |
| <b>DAFTAR TABEL</b>                                      | xiv |
| <b>BAB I PENDAHULUAN</b>                                 |     |
| 1.1 Latar Belakang                                       | 1   |
| 1.2 Rumusan Masalah                                      | 3   |
| 1.3 Tujuan   | 3   |
| 1.4 Batasan Masalah                                      | 4   |
| 1.5 Metoda Penulisan                                     | 5   |
| 1.6 Sistematika Penulisan                                | 5   |
| <b>BAB II DASAR TEORI</b>                                |     |
| 2.1 Turbin Gas dan Komponennya                           | 7   |
| 2.1.1 Definisi Turbin Gas                                | 7   |
| 2.1.2 Klasifikasi Turbin Gas                             | 8   |
| 2.1.3 Turbin yang Digunakan pada PLTGU                   | 9   |
| 2.1.4 Unit Turbin Gas                                    | 10  |
| 2.1.4.1 <i>Air Inlet Section</i>                         | 10  |
| 2.1.4.2 <i>Compresor Section</i>                         | 11  |
| 2.1.4.3 <i>Combustion Section</i>                        | 13  |
| 2.1.4.4 <i>Turbine Section</i>                           | 16  |
| 2.1.4.5 <i>Exhaust Section</i>                           | 17  |
| 2.1.5 Komponen Penunjang pada Turbin Gas                 | 18  |
| 2.2 Siklus pada Turbin Gas                               | 22  |
| 2.3 <i>AFR, Specific Fuel Consumption, Heat Rate</i> dan |     |



|  |    |
|--|----|
| Efisiensi .....  | 27 |
| 2.3.1 <i>Air Fuel Ratio</i> .....  | 27 |
| 2.3.2 <i>Specific Fuel Consumption</i> .....   | 28 |
| 2.3.3 <i>Heat Rate</i> .....   | 28 |
| 2.3.4 Efisiensi .....  | 28 |
| 2.4 Prinsip Kerja pada Turbin Gas .....  | 29 |
| 2.5 Pemeliharaan pada Turbin Gas .....   | 30 |
| 2.5.1 Pemeliharaan Selama Unit Beroperasi .....  | 31 |
| 2.5.2 Pemeliharaan Selama Unit Stop .....  | 32 |
| 2.5.2.1 <i>Fuel Nozzle Inspection</i> .....  | 32 |
| 2.5.2.2 <i>Combustor Section Inspection</i> .....  | 32 |
| 2.5.2.3 <i>Turbine Section Inspection</i> .....  | 32 |
| 2.5.2.4 <i>Major Inspection</i> .....  | 33 |
| <b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b>   |    |
| 3.1 Flow Chart Pengerjaan Tugas Akhir .....  | 35 |
| 3.2 Penjelasan Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir .....   | 36 |
| 3.2.1 Tahap Identifikasi .....   | 36 |
| 3.2.2 Studi Literatur dan Observasi Lapangan .....   | 36 |
| 3.2.3 Perumusan Masalah .....  | 37 |
| 3.2.4 Pengumpulan Data dan Perhitungan .....   | 37 |
| 3.2.5 Perhitungan dan Analisis .....   | 38 |
| 3.3 Flow Chart Metodologi Perhitungan Unjuk Kerja .....  | 38 |
| <b>BAB IV ANALISA DAN PERHITUNGAN</b>  |    |
| 4.1 Data Hasil Pengamatan .....  | 43 |
| 4.2 Perhitungan Performa Turbin Gas GT 3.2 dan GT 3.3 PLTGU PT.PJB UP Gresik Sebelum dan Sesudah <i>Turbine Inspection</i> ..... | 43 |
| 4.2.1 Perhitungan Properties pada Tiap Titik .....   | 43 |
| 4.2.2 Contoh Perhitungan Properties pada Tiap Titik dan Perhitungan Performa Turbin Gas .....                                    | 45 |
| 4.2.2.1 Perhitungan Properties di Tiap Titik .....   | 45 |
| 4.2.2.2 Perhitungan Performa Turbin Gas .....  | 51 |



|   |    |
|---|----|
| 4.2.3 Perhitungan Properties dan Performa Turbin Gas Sebelum dan Sesudah <i>Turbine Inspection</i> Dalam Bentuk Tabel ..... | 58 |
| 4.3 Perbandingan Performa Turbin Gas Sebelum dan Sesudah <i>Turbine Inspection</i> .....                                    | 63 |
| 4.3.1 Perbandingan Efisiensi Sebelum dan Sesudah <i>Turbine Inspection</i> .....  | 63 |
| 4.3.2 Perbandingan Heat Rate Sebelum dan Sesudah <i>Turbine Inspection</i> .....  | 66 |
| 4.3.3 Perbandingan Air Fuel Ratio Sebelum dan Sesudah <i>Turbine Inspection</i> .....                                       | 69 |
| 4.3.4 Perbandingan Specific Fuel Consumption Sebelum dan Sesudah <i>Turbine Inspection</i> .....                            | 72 |
| 4.4 Tahapan Pengerjaan pada OH <i>Turbine Inspection</i> ...  | 76 |
| <b>BAB V PENUTUP</b>  |    |
| 5.1 Kesimpulan .....  | 97 |
| 5.2 Saran .....   | 98 |
| <b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....   |    |
| <b>LAMPIRAN</b>   |    |
| <b>BIODATA PENULIS</b>  |    |



## DAFTAR TABEL

|  |    |
|--|----|
| Tabel 4.1 Data Operasi Sebelum TI.GT 3.2 .....   | 46 |
| Tabel 4.2 Konversi Data Operasi Sebelum TI.GT 3.2 .....                                  | 46 |
| Tabel 4.3 Data Properties dari Natural Gas dan Udara .....                               | 52 |
| Tabel 4.4 Data komposisi Natural Gas .....   | 56 |
| Tabel 4.5 Perbandingan Performa Sebelum dan Sesudah<br>TI.GT 3.2 .....                   | 58 |
| Tabel 4.6 Perbandingan Performa Sebelum dan Sesudah<br>TI.GT 3.3 .....                   | 61 |
| Tabel 4.7 Perbandingan SFC GT 3.2 Sebelum dan<br>Sesudah <i>Turbine Inspection</i> ..... | 72 |
| Tabel 4.8 Perbandingan SFC GT 3.3 Sebelum dan<br>Sesudah <i>Turbine Inspection</i> ..... | 72 |





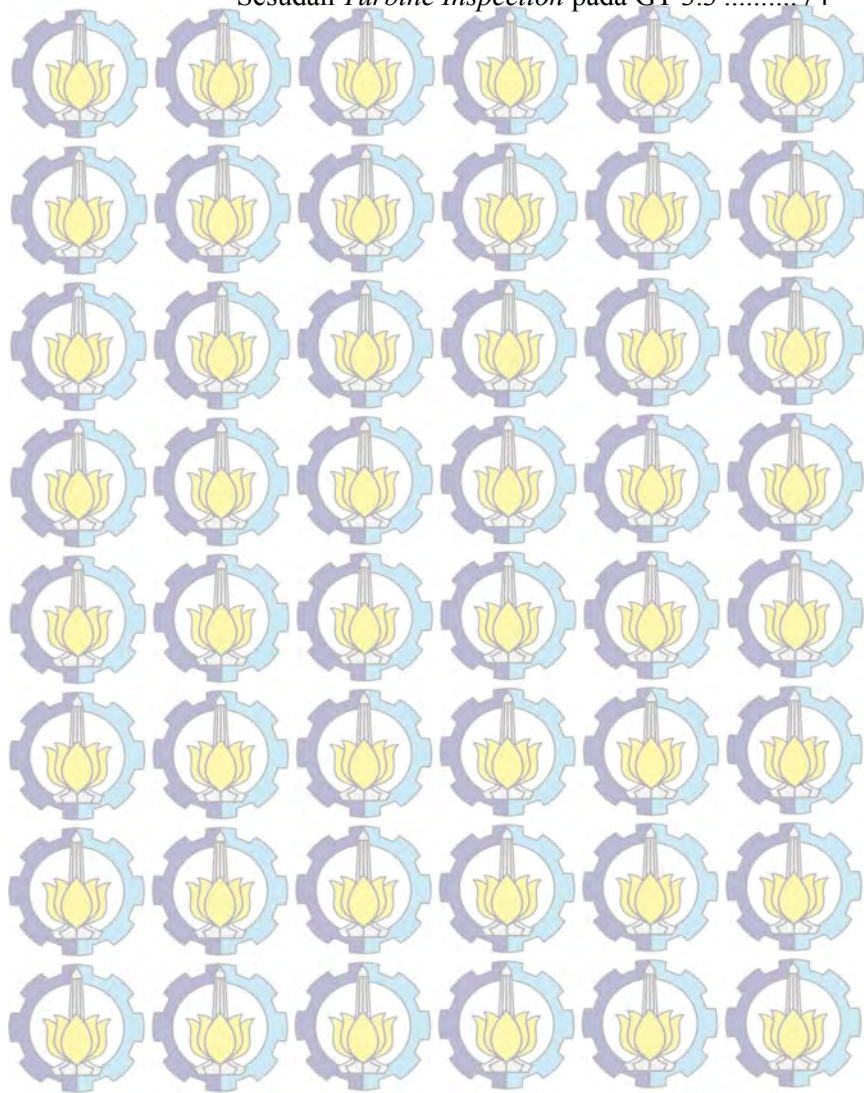
## DAFTAR GAMBAR

|  |    |
|--|----|
| Gambar 2.1 Turbin Aksi & Reaksi.....   | 7  |
| Gambar 2.2 <i>Gas Turbine Section</i> .....  | 10 |
| Gambar 2.3 Bagian Rotor Kompresor.....   | 11 |
| Gambar 2.4 Bagian Stator Kompresor .....   | 12 |
| Gambar 2.5 <i>Combustion Chamber</i> .....   | 15 |
| Gambar 2.6 <i>Exhaust Frame</i> .....  | 17 |
| Gambar 2.7 <i>Exhaust Diffuser</i> .....   | 18 |
| Gambar 2.8 <i>Fuel System</i> .....  | 20 |
| Gambar 2.9 <i>Lube Oil System</i> .....  | 21 |
| Gambar 2.10 <i>Ericson Cycle</i> .....   | 22 |
| Gambar 2.11 <i>Stirling Cycle</i> .....  | 23 |
| Gambar 2.12 <i>Simple Gas Turbine</i> .....  | 24 |
| Gambar 2.13 Siklus pada <i>Simple Gas Turbine</i> .....  | 24 |
| Gambar 2.14 <i>Gas Turbine Principle</i> .....   | 29 |
| Gambar 2.15 Siklus Pemeliharaan pada Turbin Gas .....  | 33 |
| Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir .....   | 35 |
| Gambar 3.2 Diagram Alir Perhitungan Unjuk Kerja.....   | 39 |
| Gambar 4.1 <i>Gas Turbine Operation Sample</i> .....   | 44 |
| Gambar 4.2 <i>Gas Turbine Overview</i> .....   | 44 |
| Gambar 4.3 Grafik Perbandingan Efisiensi Sebelum dan<br>Sesudah <i>Turbine Inspection</i> pada GT 3.2 .....        | 63 |
| Gambar 4.4 Grafik Perbandingan Efisiensi Sebelum dan<br>Sesudah <i>Turbine Inspection</i> pada GT 3.3 .....        | 64 |
| Gambar 4.5 Grafik Perbandingan <i>Heat Rate</i> Sebelum dan<br>Sesudah <i>Turbine Inspection</i> pada GT 3.2 ..... | 66 |
| Gambar 4.6 Grafik Perbandingan <i>Heat Rate</i> Sebelum dan<br>Sesudah <i>Turbine Inspection</i> pada GT 3.3 ..... | 67 |
| Gambar 4.7 Grafik Perbandingan AFR Sebelum dan<br>Sesudah <i>Turbine Inspection</i> pada GT 3.2 .....              | 69 |
| Gambar 4.8 Grafik Perbandingan AFR Sebelum dan<br>Sesudah <i>Turbine Inspection</i> pada GT 3.3 .....              | 70 |
| Gambar 4.9 Grafik Perbandingan SFC Sebelum dan   |    |



Sesudah *Turbine Inspection* pada GT 3.2 ..... 73

Gambar 4.10 Grafik Perbandingan SFC Sebelum dan  
Sesudah *Turbine Inspection* pada GT 3.3 ..... 74





## DAFTAR PUSTAKA

Black & Veatch. 1996. "*Power Plant Engineering*". United States of America

Borgnakke, Claus dan Richard E Sonntag. 2009. "*Fundamental of Thermodynamics*". Seventh Edition. John Wiley & Sons Inc. United States of America

Brandt, D.E dan R.R Wesorick. 2000. "*GE Gas Turbine Design Philosophy*". GE Industrial & Power System. New York

Investment, Inisiator Aceh Power. "*Gas Turbine System*". 3 Maret 2014. [http://academia.edu/67779375/Turbine\\_Gas.html](http://academia.edu/67779375/Turbine_Gas.html)

Moran, Michael J dan Howard N Saphiro. 2006. "*Fundamental of Engineering Thermodynamics*". Fifth Edition. John Wiley & Sons Inc. United Kingdom.

Raja, A.K dan Amith Prakash Srivastava. 2006. "*Power Plant Engineering*". New Delhi. New Age International

Reynolds, William C. dan Henry C. Perlkins. 1994. "*Termodinamika Teknik*". Edisi Kedua. Jakarta. Penerbit Erlangga



## BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Kota Jember pada tanggal 08 Mei 1994, dari pasangan Bapak Istamar dan Ibu Rusmini. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Jenjang pendidikan formal yang pernah ditempuh adalah TK ABA Aisyah 1 Ambulu, SD Muhammadiyah Krajan - Andongsari Ambulu, SMP Negeri 1 Ambulu, dan lanjut ke jenjang pendidikan pada tingkat SLTA di SMA Negeri 1 Jember.

Pada tahun 2012 penulis mengikuti ujian masuk Program Diploma III ITS Kelas Kerjasama PT. PLN (Persero) dan diterima sebagai mahasiswa di Program Studi D III Teknik Mesin Kelas Kerjasama PT. PLN (Persero), Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan NRP 2112 038 020. Penulis mengambil bidang keahlian Konversi Energi sesuai dengan kelas yang diikuti dan mengambil Tugas Akhir dibidang yang sama.

Selama duduk di bangku kuliah penulis aktif mengikuti kegiatan perkuliahan. Penulis juga pernah mengikuti berbagai kegiatan dan bergabung dalam Organisasi Mahasiswa. Penulis juga sempat menjadi pengurus dalam Organisasi Kepengurusan HIMASA 2013 serta ikut andil pada Kepengurusan BEM-ITS periode 2013/2014. Kegiatan yang pernah diikuti penulis diantaranya OLMIPA se Jawa-Bali (2012), ESQ Basic Training (2012), GERIGI (Generasi Integralistik) ITS (2012), LKTI-M Nasional (2013), Pelatihan dan Keterampilan Kinerja oleh Staf Ahli di pabrik Coca Cola Ltd. (2014). PT. PJB Unit Pembangunan Gresik merupakan tempat kerja praktek penulis selama kurang lebih 4 bulan pada tahun 2015.

Alamat email : [restoe.boemi@gmail.com](mailto:restoe.boemi@gmail.com)

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dengan bertambahnya kebutuhan listrik pada masa sekarang ini, Indonesia melaksanakan program percepatan pembangunan pembangkit listrik sebesar 35.000 MW dengan mendirikan beberapa pembangkit listrik, terutama Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) berbahan bakar gas. PLTGU dengan bahan bakar gas kini sedang dikembangkan di berbagai wilayah karena bahan bakar utama gas yang lebih ekonomis dibanding dengan bahan bakar batubara ataupun minyak. Prinsip kerja dari PLTGU adalah panas dari hasil pembakaran gas dan udara digunakan untuk memutar turbin yang seporos dengan kompresor dan generator, sehingga generator menghasilkan listrik. Dalam prosesnya pada PLTGU terdapat berbagai macam peralatan utama seperti kompresor, turbin, combustor, dan generator. Peralatan tersebut jika digunakan terus menerus akan berkurang keandalan (performa) serta umur pakainya (*lifetime*), hal ini akan berkaitan langsung dengan efisiensi dari pembangkit tersebut. Jika efisiensi pembangkit semakin rendah, maka biaya operasional yang dibutuhkan akan semakin mahal. Oleh karena itu, untuk menjaga agar operasional turbin gas tersebut pada keadaan optimal, maka dilakukan tindakan *preventive maintenance* yakni salah satunya adalah dengan *turbine inspection*.

PLTGU sering mengalami perubahan beban untuk memenuhi kebutuhan daya listrik yang berubah-ubah sewaktu-waktu, tergantung dari permintaan konsumen. Beban PLTGU yang berubah-ubah akan berpengaruh terhadap kinerja dari tiap-tiap komponennya antara lain turbin uap, pompa, kondensor, dan pembangkit gas. Dalam merespon perubahan beban yang terjadi, maka secara otomatis suplai bahan bakar, udara pembakaran, serta gas buang yang digunakan untuk pembentukan uap ikut berubah pula. Dengan mengetahui efisiensi pada tiap beban maka dapat diketahui grafik efisiensi pada PLTG sehingga dapat diketahui pada beban berapakah



efisiensi PLTG yang paling tinggi. Secara umum proses produksi listrik di PLTGU adalah menggabungkan dua siklus yaitu brayton untuk PLTG dan rankine untuk PLTU. Udara dinaikan tekananya oleh kompresor, selanjutnya bersama bahan bakar di bakar di ruang bakar dan di ekspansikan ke turbin gas. Gas sisa pembakaran keluar turbin di manfaatkan sebagai pemanas air di HRSG untuk medapatkan uap yang nantinya di ekspasikan ke turbin uap. Proses diatas memberikan gambaran bahwa unjuk kerja siklus PLTGU sangat dipengaruhi proses yang terjadi pada PLTG nya. Agar PLTG menjadi aman, handal dan efisien, maka proses perawatan seperti yang dilakukan oleh PT PJB dalam proses *maintenance* .

Dari latar belakang inilah penulis selanjutnya akan melakukan analisis termodinamika untuk mengetahui performa dari PLTGU blok GT 3.2 dan GT 3.3 pada PT.PJB Unit Pembangkitan Gresik ,disertai pengaruh perawatan terhadap performa turbin gas khususnya skala *overhaul turbine inspection* dengan variasi beban yang berbeda-beda.

## 1.2 Rumusan Masalah

- Bagaimana perbandingan efisiensi turbin gas di PLTGU UP Gresik khususnya di blok GT 3.2 dan GT 3.3 PT. PJB UP Gresik antara turbin gas sebelum dan sesudah di *turbine inspection* dengan beban generator yang bervariasi.
- Bagaimana perbandingan *heat rate* turbin gas di PLTGU UP Gresik khususnya di blok GT 3.2 dan GT 3.3 PT. PJB UP Gresik antara turbin gas sebelum dan sesudah di *turbine inspection* dengan beban generator yang bervariasi.
- Bagaimana perbandingan *air fuel ratio* turbin gas di PLTGU UP Gresik khususnya di blok GT 3.2 dan GT 3.3 PT. PJB UP Gresik antara turbin gas sebelum dan sesudah di *turbine inspection* dengan beban generator yang bervariasi.
- Bagaimana perbandingan *specific fuel consumption* turbin gas di PLTGU UP Gresik khususnya di blok GT 3.2 dan GT 3.3 PT. PJB UP Gresik antara turbin gas sebelum dan sesudah di *turbine inspection* dengan beban generator yang bervariasi.
- Bagaimana saja tahapan pengerjaan *turbine inspection* yang dilakukan di dalam blok GT 3.2 dan GT 3.3 UP Gresik.

## 1.3 Tujuan

Tujuan dari penulisan tugas akhir ini ditinjau dari latar belakang dan rumusan masalah adalah sebagai berikut :

- Mengetahui perbandingan efisiensi turbin gas di PLTGU UP Gresik khususnya di blok GT 3.2 dan GT 3.3 PT. PJB UP Gresik antara turbin gas sebelum dan sesudah di *turbine inspection* dengan beban generator yang bervariasi.
- Mengetahui perbandingan *heat rate* turbin gas di PLTGU UP Gresik khususnya di blok GT 3.2 dan GT 3.3 PT. PJB UP Gresik antara turbin gas sebelum dan sesudah di



*turbine inspection* dengan beban generator yang bervariasi.

- Mengetahui perbandingan *specific fuel consumption* turbin gas di PLTGU UP Gresik khususnya di blok GT 3.2 dan GT 3.3 PT. PJB UP Gresik antara turbin gas sebelum dan sesudah di *turbine inspection* dengan beban generator yang bervariasi.
- Mengetahui perbandingan *air fuel ratio* turbin gas di PLTGU UP Gresik khususnya di blok GT 3.2 dan GT 3.3 PT. PJB UP Gresik antara turbin gas sebelum dan sesudah di *turbine inspection* dengan beban generator yang bervariasi.
- Mengetahui tahapan pekerjaan *turbine inspection* yang dilakukan di dalam blok GT 3.2 dan GT 3.3 UP Gresik.

#### **1.4 Batasan Masalah**

Pada laporan tugas akhir ini penelitian serta pembahasan tentang perbandingan performa turbin gas sebelum dan sesudah *turbine inspection* dengan variasi beban di PLTGU blok GT 3.2 dan GT 3.3 PJB UP Gresik mencapai tujuan yang telah ditentukan. Adapun batasan masalah yang akan penulis bahas adalah :

- Hanya membahas proses pada PLTGU blok GT 3.2 dan GT 3.3 serta tidak pada pembangkit dengan energi lain.
- Pengambilan data berdasarkan *database Central Control Room (CCR)* dan *performance test worksheet (sheet)* pada variasi beban yang berbeda-beda pada PLTGU blok GT 3.2 dan GT 3.3
- Analisa menggunakan metode termodinamika serta menggunakan bahan bakar natural gas yang diambil dari 6 produsen (PHEWMO,KEI,SANTOS,SCI,PGN SAKA,MKS)
- PLTG menggunakan siklus brayton dengan system *open cycle* .

## 1.5 Metode Penulisan

Metode penulisan pada tugas akhir Analisa Perbandingan Performa Turbin Gas Sebelum dan Sesudah *Turbine Inspection* Dengan Variasi Beban di PLTGU Blok GT 3.2 dan GT 3.3 PT. PJB UP Gresik adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Studi literatur sebagai bahan persiapan untuk menganalisis sistem. Studi literatur berkaitan dengan analisis perhitungan termodinamika dan unjuk kerja

2. Konsultasi Dengan Dosen Pembimbing

Dalam penulisan tugas akhir ini perlu mengadakan konsultasi/responsi dengan dosen pembimbing.

3. Observasi Data

Melakukan observasi data – data melalui media internet dan dari hasil pengamatan langsung di PLTGU blok GT. 3.2 dan GT. 3.3 UP Gresik.

4. Analisa data

Menghitung efisiensi dan mengetahui proses perawatan, dengan menggunakan buku-buku pedoman dan data data.

5. Membuat Kesimpulan

Setelah menyelesaikan laporan tugas akhir dapat mengambil kesimpulan tentang hasil dari analisa tersebut.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Laporan Tugas Akhir ini terdiri dari 5 bab, berdasarkan penulisan-penulisan tertentu, yang nantinya diharapkan agar pembaca lebih mudah dalam memahaminya. Sistematika penulisannya adalah sebagai berikut :

1. BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini berisikan tentang Latar Belakang, Perumusan Masalah, Tujuan Penulisan, Manfaat Penulisan, Batasan Masalah, Metode Penulisan dan Sistematika Penulisan

2. BAB II DASAR TEORI

Pada bab ini berisi mengenai teori yang mendasari penyusunan laporan tugas akhir secara umum yang berhubungan dengan tinjauan umum mengenai turbin gas



pada PLTGU, siklus termodinamika pada turbin gas, serta pengaruh overhaul.

3. **BAB III METODOLOGI**

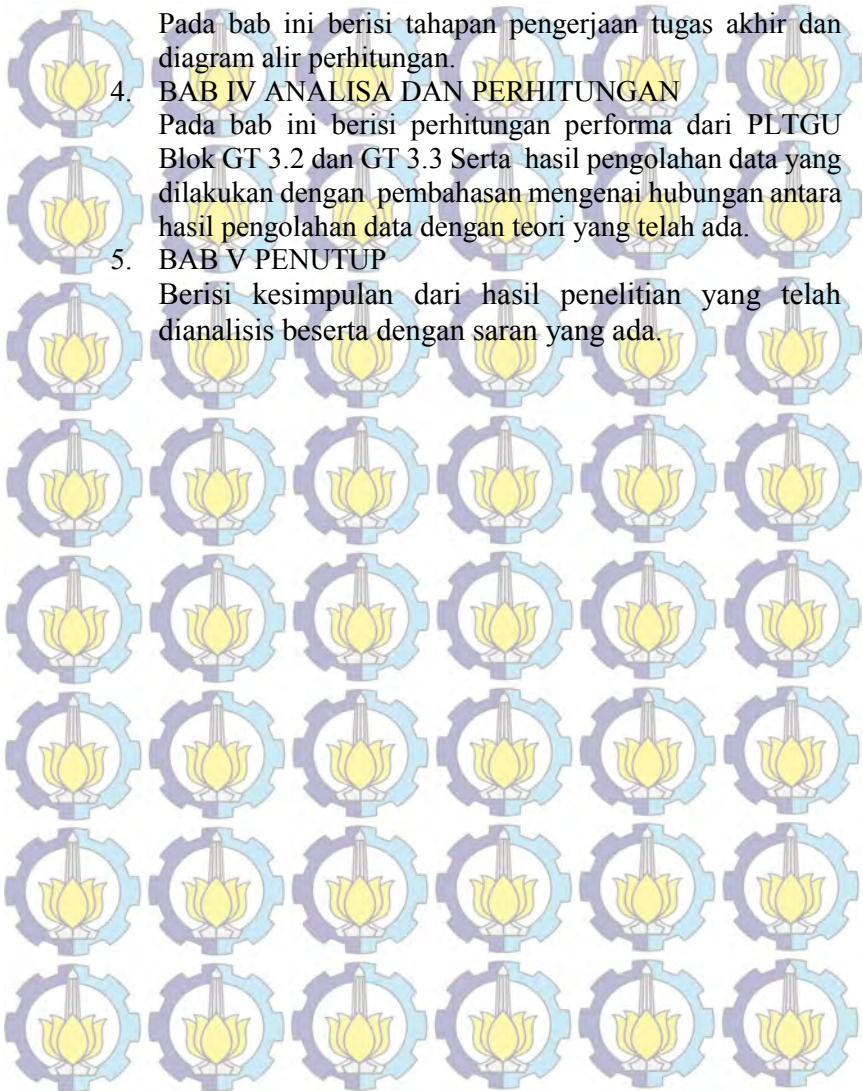
Pada bab ini berisi tahapan pengerjaan tugas akhir dan diagram alir perhitungan.

4. **BAB IV ANALISA DAN PERHITUNGAN**

Pada bab ini berisi perhitungan performa dari PLTGU Blok GT 3.2 dan GT 3.3 Serta hasil pengolahan data yang dilakukan dengan pembahasan mengenai hubungan antara hasil pengolahan data dengan teori yang telah ada.

5. **BAB V PENUTUP**

Berisi kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dianalisis beserta dengan saran yang ada.



## BAB II

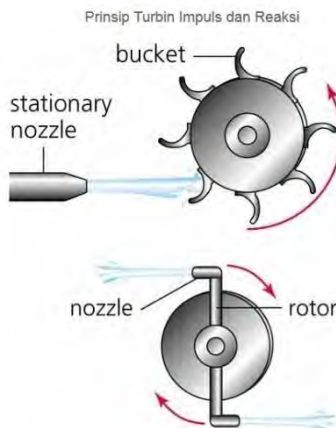
### DASAR TEORI

#### 2.1 Turbin Gas dan Komponenya

##### 2.1.1 Definisi turbin gas

Turbin adalah suatu mesin rotari yang berfungsi untuk mengubah energi dari aliran fluida menjadi energi gerak yang bermanfaat.

Mesin turbin yang paling sederhana terdiri dari sebuah bagian yang berputar disebut rotor, yang terdiri atas sebuah poros/*shaft* dengan sudu-sudu atau *blade* yang terpasang disekelilingnya. Rotor tersebut berputar akibat dari tumbukan aliran fluida atau berputar sebagai reaksi dari aliran fluida tersebut. Oleh karena itulah turbin terbagi atas 2 jenis, yaitu turbin impuls dan turbin reaksi. Rotor pada turbin impuls berputar akibat tumbukan fluida bertekanan yang diarahkan oleh nozzle kepada rotor tersebut, sedangkan rotor turbin reaksi berputar akibat dari tekanan fluida itu sendiri yang keluar dari ujung sudu melalui nozzle. Untuk lebih jelasnya dapat kita amati pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.1 Turbin Aksi & Reaksi

(sumber : Power Plant Engineering, PPA Academy)



### 1) Turbin Aksi

Turbin ini merubah arah dari aliran fluida berkecepatan tinggi menghasilkan putaran impuls dari turbin dan penurunan energi kinetik dari aliran fluida. Tidak ada perubahan tekanan yang terjadi pada fluida, penurunan tekanan terjadi di nozzle.

### 2) Turbin Reaksi

Turbin ini menghasilkan torsi dengan menggunakan tekanan atau massa gas atau fluida. Tekanan dari fluida berubah pada saat melewati sudu rotor. Pada turbin jenis ini diperlukan semacam sudu pada *casing* untuk mengontrol fluida kerja seperti yang bekerja pada turbin tipe *multistage* atau turbin ini harus terendam penuh pada fluida kerja.

Turbin gas adalah suatu penggerak mula yang memanfaatkan gas sebagai fluida kerja. Didalam turbin gas energi kinetik dikonversikan menjadi energi mekanik berupa putaran yang menggerakkan roda turbin sehingga menghasilkan daya. Bagian turbin yang berputar disebut rotor atau roda turbin dan bagian turbin yang diam disebut stator atau rumah turbin. Rotor memutar poros daya yang menggerakkan beban (generator listrik, pompa, kompresor atau yang lainnya).

Turbin gas merupakan salah satu komponen dari suatu sistem turbin gas. Sistem turbin gas yang paling sederhana terdiri dari komponen yaitu *air inlet*, kompresor, ruang bakar, turbin gas dan *exhaust*.

## 2.1.2 Klasifikasi turbin gas

### a. Berdasarkan sistim operasinya

1. *Stand by duty* (siaga)
2. *Continous duty* (terus-menerus)

### b. Berdasarkan jenis bahan bakar yang dipakai

1. Bahan bakar cair (*distillate*)
2. Bahan bakar gas
3. Bahan bakar gas dan cair (*dual fuel*)

### c. Berdasarkan arah aliran fluida

1. Arah aliran axial

2. Arah aliran radial

**d. Berdasarkan konfigurasi poros**

1. Poros tunggal (*single shaft*)

2. Poros terpisah (*split shaft*)

**e. Berdasarkan siklus fluida kerja**

1. Siklus terbuka

2. Siklus tertutup

**f. Berdasarkan sistem belahan rumah turbin dan kompresor**

1. *Horizontal split casing*

2. *Vertical split casing*

**2.1.3 Turbin yang digunakan pada PLTGU**

Type : MW 701 D, *Axial Flow Reaction*

Designed : Mitsubishi Heavy Industries (MHI Japan)

Putaran : 3000 rpm

Jumlah Tingkat : 4

Ruang Bakar : *Canular Type*

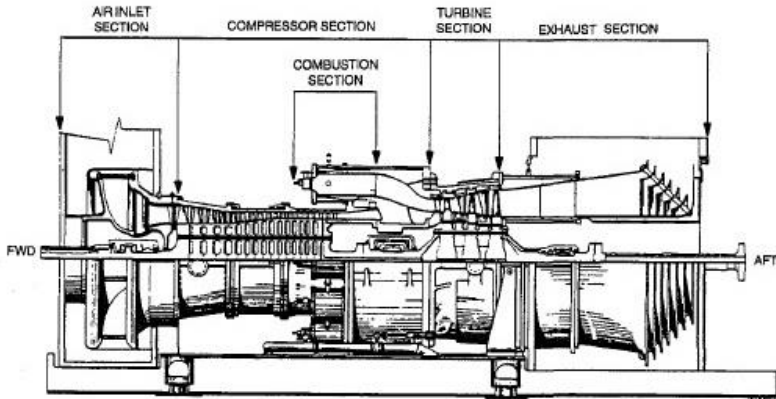
Jumlah Ruang Bakar : 18

Compressor : *Axial Flow Type*

Jumlah Tingkat : 19



## 2.1.4 Unit turbin gas



Gambar 2.2 Gas Turbine Section  
(sumber : Power Plant Engineering, Black & Veatch)

### 2.1.4.1 Air Inlet Section

Berfungsi untuk menyaring kotoran dan debu yang terbawa dalam udara sebelum masuk ke kompresor. Bagian ini terdiri dari:

1. *Air Inlet Housing*, merupakan tempat udara masuk dimana di dalamnya terdapat peralatan pembersih udara.
2. *Inertia Separator*, berfungsi untuk membersihkan debu-debu atau partikel yang terbawa bersama udara masuk.
3. *Pre-Filter*, merupakan penyaringan udara awal yang dipasang pada inlet house.
4. *Main Filter*, merupakan penyaring utama yang terdapat pada bagian dalam *inlet house*, udara yang telah melewati penyaring ini masuk ke dalam kompresor aksial.
5. *Inlet Bellmouth*, berfungsi untuk membagi udara agar merata pada saat memasuki ruang kompresor.
6. *Inlet Guide Vane*, merupakan blade yang berfungsi sebagai pengatur jumlah udara yang masuk agar sesuai dengan yang diperlukan.

#### 2.1.4.2 Compresor Section

Komponen utama pada bagian ini adalah *axial flow compressor*, berfungsi untuk mengkompresikan udara yang berasal dari *inlet air section* hingga bertekanan tinggi sehingga pada saat terjadi pembakaran dapat menghasilkan gas panas berkecepatan tinggi yang dapat menimbulkan daya output turbin yang besar. *Axial flow compressor* terdiri dari dua bagian yaitu:

1. *Compressor Rotor Assembly*. Merupakan bagian dari kompresor aksial yang berputar pada porosnya. Rotor ini memiliki 17 tingkat sudu yang mengompresikan aliran udara secara aksial dari 1 atm menjadi 17 kalinya sehingga diperoleh udara yang bertekanan tinggi. Bagian ini tersusun dari *wheels*, *stubshaft*, *tie bolt* dan sudu-sudu yang disusun kosentris di sekeliling sumbu rotor.

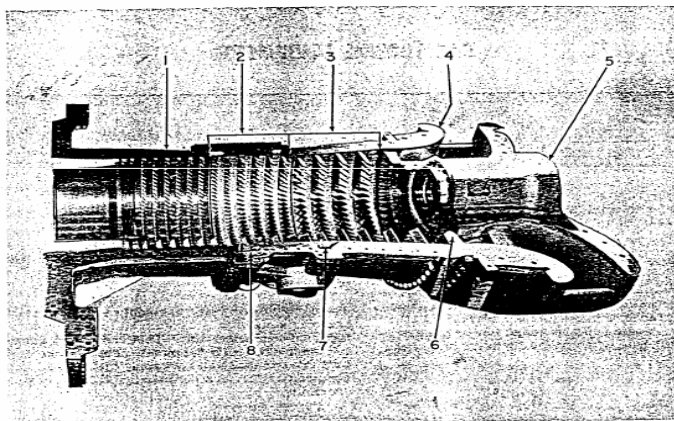


Gambar 2.3 Bagian Rotor Kompresor  
(sumber : PPA PJB, Mitsubishi MW 701D)

2. *Compressor Stator*. Merupakan bagian dari casing gas turbin yang terdiri dari:



1. *Inlet Casing*, merupakan bagian dari casing yang mengarahkan udara masuk ke *inlet bellmouth* dan selanjutnya masuk ke *inlet guide vane*.
2. *Forward Compressor Casing*, bagian casing yang di dalamnya terdapat empat *stage* kompresor blade.
3. *Aft Casing*, bagian casing yang di dalamnya terdapat kompresor blade tingkat 5-10.
4. *Discharge Casing*, merupakan bagian *casing* yang berfungsi sebagai tempat keluarnya udara yang telah dikompresi.



- |                      |   |
|----------------------|---|
| 1. Discharge Section | 5. No. 1 Bearing Housing                |
| 2. Aft Section       | 6. Variable Inlet Guide Vanes           |
| 3. Forward Section   | 7. 4th Stage Bleed Air Annular Chamber  |
| 4. Inlet Section     | 8. 10th Stage Bleed Air Annular Chamber |

Figure 2-2, Compressor Casing (Lower Half)

### Gambar 2.4 Bagian Stator Kompresor

(sumber : *Inisiator Aceh Power Investment-Gas Turbine System*)

#### Prinsip Kerja Kompresor

Kompresor yang biasanya dipakai pada turbin gas adalah *axial compressore* dan *centrifugal compressore*. Pada *axial compressore*, bentuk dari sudu-sudu rotor mendekati bentuk dari airfoils. Secara global kompresor bekerja dengan cara menghisap

udara kemudian mendorong udara ini ke sudu tetap. Pada sudu tetap ini, bentuknya menyerupai bentuk dari difusor. Difusor ini berfungsi untuk memperbesar tekanan dan menurunkan kecepatan dari udara.

#### **2.1.4.3 Combustion Section**

Pada bagian ini terjadi proses pembakaran antara bahan bakar dengan fluida kerja yang berupa udara bertekanan tinggi dan bersuhu tinggi. Hasil pembakaran ini berupa energi panas yang diubah menjadi energi kinetik dengan mengarahkan udara panas tersebut ke *transition pieces* yang juga berfungsi sebagai nozzle. Fungsi dari keseluruhan sistem adalah untuk mensuplai energi panas ke siklus turbin. Sistem pembakaran ini terdiri dari komponen-komponen berikut yang jumlahnya bervariasi tergantung besar frame dan penggunaan turbin gas. Komponen-komponen itu adalah :

1. *Combustion Chamber*, berfungsi sebagai tempat terjadinya pencampuran antara udara yang telah dikompresi dengan bahan bakar yang masuk.
2. *Combustion Liners*, terdapat di dalam ruang bakar yang berfungsi sebagai tempat berlangsungnya pembakaran.
3. *Fuel Nozzle*, berfungsi sebagai tempat masuknya bahan bakar ke dalam *combustion liner*.
4. *Ignitors (Spark Plug)*, berfungsi untuk memercikkan bunga api ke dalam *combustion chamber* sehingga campuran bahan bakar dan udara dapat terbakar.
5. *Transition Fieces*, berfungsi untuk mengarahkan dan membentuk aliran gas panas agar sesuai dengan ukuran nozzle dan sudu-sudu turbin gas.
6. *Cross Fire Tubes*, berfungsi untuk meratakan nyala api pada semua *combustion chamber*.
7. *Flame Detector*, merupakan alat yang dipasang untuk mendeteksi proses pembakaran terjadi.

*Combustion chamber* yang ada disusun kosentris mengelilingi *axial flow compressor* dan disambungkan dengan keluaran kompresor udara dari *axial flow compressor* yang dialirkan langsung ke masing-masing ruang bakar. Zona pembakaran pada *combustion chamber* ada tiga yaitu:



a) *Primary Zone*, merupakan tempat dimana bahan bakar berdifusi dengan udara kompresor untuk membentuk campuran udara bahan bakar yang siap dibakar

b) *Secondary Zone*, adalah zona penyempurnaan pembakaran sebagai kelanjutan pembakaran pada *primary zone*.

c) *Dilution Zone*, merupakan zona untuk mereduksi temperatur gas hasil pembakaran pada keadaan yang diinginkan pada saat masuk ke *first stage nozzles*.

*Combustion liners* didesain dengan satu seri lubang dan louvers yang ditempatkan didalam chambers. Digunakan untuk mencampurkan bahan udara dari kompresor dan bahan bakar dari nozel yang membakar campuran ini.

a. *Fuel nozzle* terdapat pada ujung ruang bakar dan masuk ke *combustion liners*. Fungsi dari *fuel nozzle* ini adalah untuk mengabutkan bahan bakar dan mengarahkannya ke zona reaksi pada ruang bakar.

b. *Transition piece* terdapat antara *combustion liners* dan *first stage nozzle*. Alat ini digunakan untuk mengarahkan udara panas yang dihasilkan pada *combustion section* ke *first stage nozzle*.

c. *Spark plugs* terdapat pada bagian samping ruang bakar dan masuk ke *combustion liners*. *Spark plugs* berfungsi untuk menyulut campuran bahan bakar dan udara pada saat turbin gas *start up*. Pembakaran akan terus terjadi selama suplai bahan bakar dan udara terus berlangsung. *Spark plugs* terpasang pada sebuah pegas setelah proses pembakaran terjadi, tekanan yang dihasilkan meningkat dan akan memaksa plugs naik menuju *casing* dan mengeluarkan gas panas.

d. *Cross fire tube* berfungsi untuk menghubungkan semua ruang bakar. Tabung ini digunakan untuk mengirimkan pengapian dari satu *combustion liners* ke yang berikutnya selama *start up*.

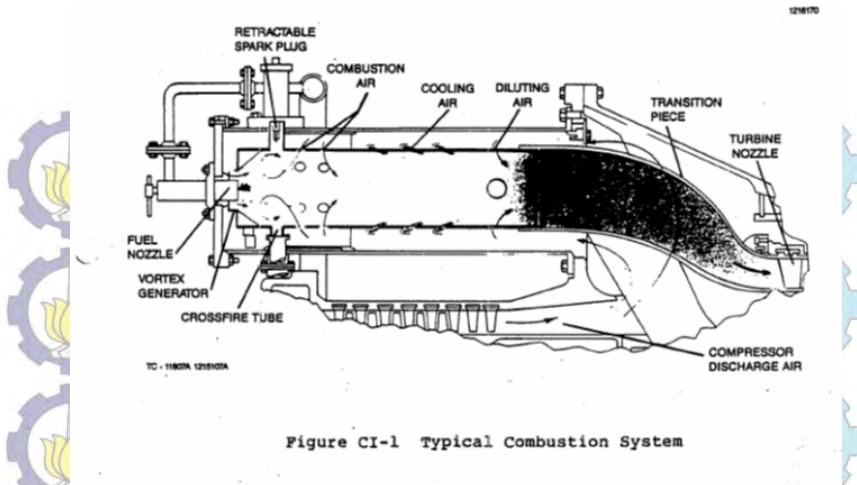


Figure CI-1 Typical Combustion System

### Gambar 2.5 Combustion Chamber

(sumber : Power Plant Engineering, Black & Veatch)

#### Prinsip Kerja Combuster

Dari kompresor, udara bertekanan dibawa ke ruang bakar (*combuster*). Di ruang bakar, udara bertekanan dibakar bersama dengan *fuel*/bahan bakar. Bahan bakar yang umum dipakai dalam ruang bakar ini adalah gas alam (*natural gas*). Selain gas alam, bahan bakar yang biasa dipakai sebagai bahan bakar adalah *fuel oil*/minyak (dengan efisiensi tinggi). Bahan bakar yang dibakar berfungsi untuk menaikkan temperatur. *Combuster* didesain untuk menghasilkan campuran, pengenceran dan pendinginan sehingga gas yang keluar dari ruang bakar merupakan temperatur rata-rata dari campuran. Panjang dari ruang bakar didesain dengan mempertimbangkan waktu dan tempat yang cukup untuk bahan bakar bisa terbakar sempurna dan memudahkan pematik untuk membakar bahan bakar menjadi lebih mudah. Desain ruang bakar juga mempertimbangkan masalah residu pembakaran. Desain ruang bakar harus mempertimbangkan bagaimana mereduksi gas  $\text{NO}_x$ .



#### 2.1.4.4 Turbine Section

*Turbin section* merupakan tempat terjadinya konversi energi kinetik menjadi energi mekanik yang digunakan sebagai penggerak kompresor aksial dan perlengkapan lainnya. Dari daya total yang dihasilkan kira-kira 60 % digunakan untuk memutar kompresornya sendiri, dan sisanya digunakan untuk kerja yang dibutuhkan. Komponen-komponen pada *turbin section* adalah sebagai berikut :

- a) *Turbin Rotor Case*
- b) *First Stage Nozzle*, yang berfungsi untuk mengarahkan gas panas ke *first stage turbine wheel*.
- c) *First Stage Turbine Wheel* , berfungsi untuk mengkonversikan energi kinetik dari aliran udara yang berkecepatan tinggi menjadi energi mekanik berupa putaran rotor.
- d) *Second Stage Nozzle* dan *Diafragma* , berfungsi untuk mengatur aliran gas panas ke *second stage turbine wheel*, sedangkan *diafragma* berfungsi untuk memisahkan kedua turbin wheel. *Second Stage Turbine* , berfungsi untuk memanfaatkan energi kinetik yang masih cukup besar dari *first stage turbine* untuk menghasilkan kecepatan putar rotor yang lebih besar.

#### Prinsip Kerja Turbin

Pada turbin gas, *temperature and preassure drop*, dikonversi diubah menjadi energi mekanik. Konversi energi berlangsung dalam dua tahap. Pada bagian nosel, gas panas mengalami proses ekspansi. Hampir 2/3 dari kerja yang dibutuhkan dari siklus ini diperlukan untuk menggerakkan kompresor. Oleh karena itu, kerja output dari turbin, dipakai untuk menggerakkan poros penggerak beban, hanya mempresentasikan 1/3 dari kerja siklus.

Pada turbin, khususnya pada 1<sup>st</sup> stage, yang menggerakkan bucket dan disc, harus mampu menahan *temperature* yang cukup ekstrim (2200°F/ 1204°C). Temperatur yang sangat tinggi ini juga bercampur dengan kotoran/ kontaminan dari udara dan bahan bakar sehingga sangat rawan terkena korosi. Kontaminasi ini sangat sulit

untuk dikontrol, sehingga dibutuhkan bahan paduan/*alloys* dan proses *coating* yang cukup bagus untuk melindungi material dari korosi dan memaksimalkan umur dari komponen ini.

#### 2.1.4.5 Exhaust Section

Merupakan bagian akhir dari suatu turbin gas, yang berfungsi untuk membuang gas hasil sisa pembakaran yang digunakan pada turbin. Exhaust section terdiri dari beberapa bagian, yaitu :

- a) Exhaust frame assembly
- b) Exhaust diffuser assembly

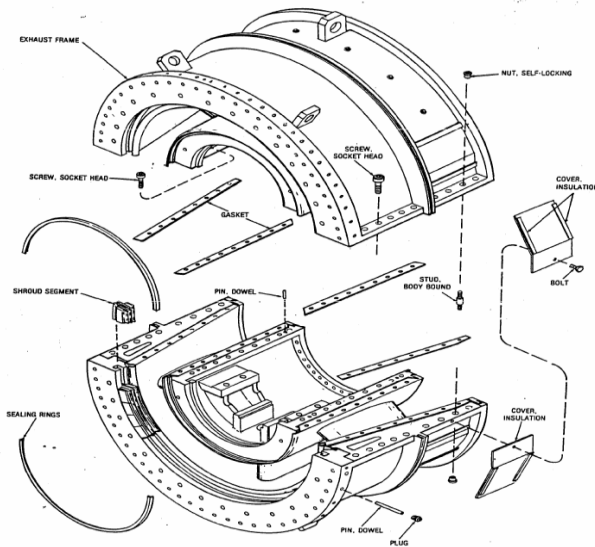


Figure MI-46 Exploded View, Exhaust Frame

Gambar 2.6 Exhaust Frame

(sumber : Inisiator Aceh Power Investment-Gas Turbine System)

Exhaust gas keluar dari turbin gas melalui exhaust diffuser pada exhaust frame assembly, lalu mengalir ke exhaust plenum dan kemudian didifusikan dan dibuang ke atmosfer melalui exhaust stack, sebelum dibuang ke atmosfer gas panas sisa tersebut diukur



dengan exhaust thermocouple dimana hasil pengukuran ini digunakan juga untuk data pengontrolan temperatur dan proteksi temperatur trip. Pada exhaust area terdapat 18 buah termokopel yaitu, 12 buah untuk temperatur kontrol dan 6 buah untuk temperatur trip.

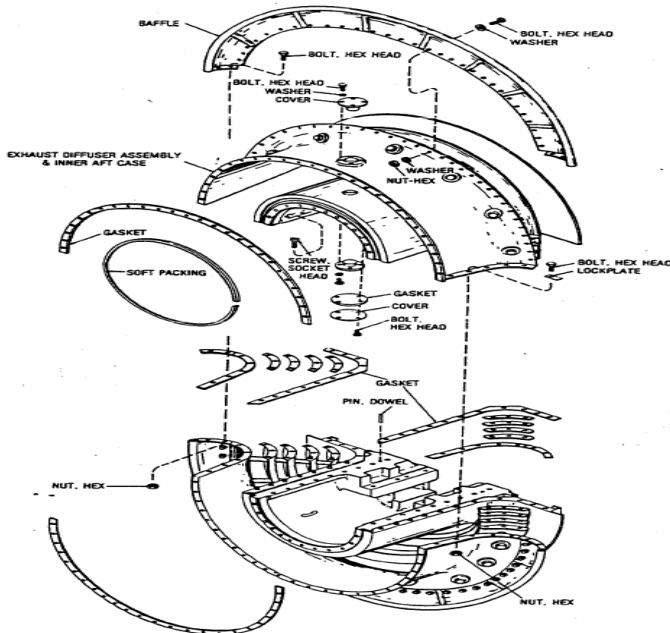


Figure MI-47 Exploded View, Exhaust Diffuser

Gambar 2.7 Exhaust Diffuser  
(sumber : Inisiator Aceh Power Investment-Gas Turbine System)

### 2.1.5 Komponen penunjang pada turbin gas

Ada beberapa komponen penunjang yaitu :

1. Starting Equipment

Berfungsi untuk melakukan *start up* sebelum turbin bekerja. Jenis-jenis starting equipment yang digunakan di unit-unit turbin gas pada umumnya adalah :

- a) Diesel Engine, (PG –9001A/B)
- b) Induction Motor, (PG-9001C/H dan KGT 4X01, 4X02 dan 4X03)
- c) Gas Expansion Turbine (Starting Turbine)

## 2. *Coupling dan Accessory Gear*

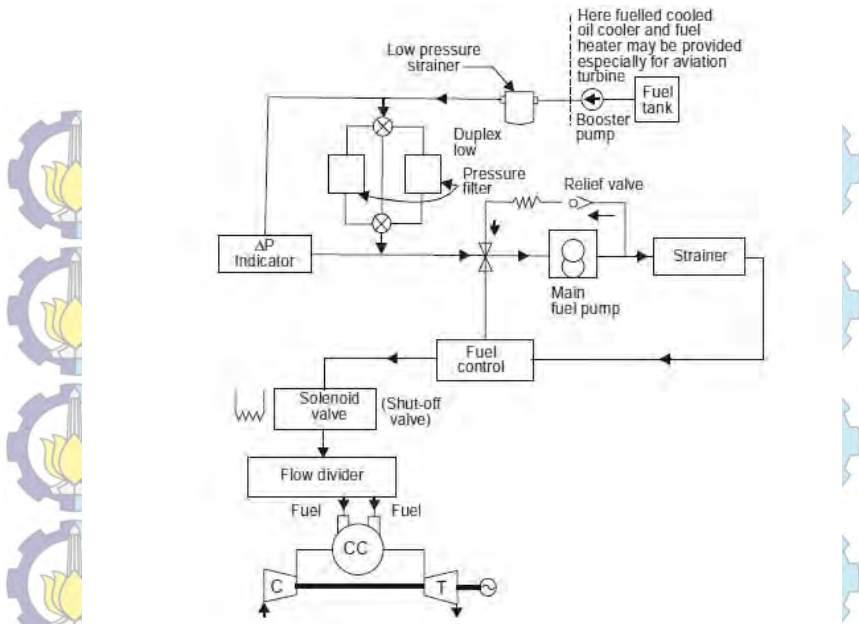
Berfungsi untuk memindahkan daya dan putaran dari poros yang bergerak ke poros yang akan digerakkan. Ada tiga jenis coupling yang digunakan, yaitu:

1. *Jaw Cluth*, menghubungkan starting turbine dengan accessory gear dan HP turbin rotor.
2. *Accessory Gear Coupling*, menghubungkan accessory gear dengan HP turbin rotor.
3. *Load Coupling*, menghubungkan LP turbin rotor dengan kompressor beban.

## 3. *Fuel System*

Bahan bakar yang digunakan berasal dari fuel gas system dengan tekanan sekitar 15 kg/cm<sup>2</sup>. Fuel gas yang digunakan sebagai bahan bakar harus bebas dari cairan kondensat dan partikel-partikel padat. Untuk mendapatkan kondisi tersebut diatas maka sistem ini dilengkapi dengan knock out drum yang berfungsi untuk memisahkan cairan-cairan yang masih terdapat pada fuel gas.





Gambar 2.8 Fuel System  
(sumber : Power Plant Engineering , A.K Rajah)

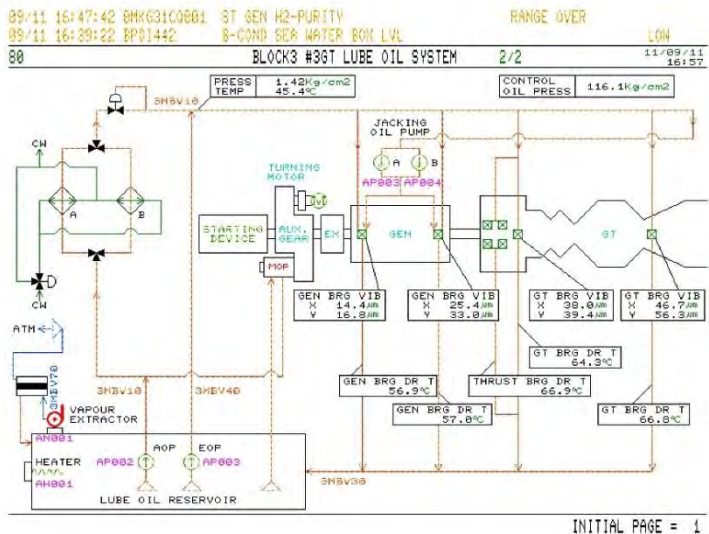
#### 4. Lube Oil System

Lube oil system berfungsi untuk melakukan pelumasan secara kontinu pada setiap komponen sistem turbin gas. Lube oil disirkulasikan pada bagian-bagian utama turbin gas dan trush bearing juga untuk accessory gear dan yang lainnya. Lube oil system terdiri dari:

- Oil Tank (Lube Oil Reservoir)
- Oil Quantity
- Pompa
- Filter System
- Valving System
- Piping System
- Instrumen untuk oil

Pada turbin gas terdapat tiga buah pompa yang digunakan untuk mensuplai lube oil guna keperluan lubrikasi, yaitu:

- a. *Main Lube Oil Pump*, merupakan pompa utama yang digerakkan oleh HP shaft pada gear box yang mengatur tekanan discharge lube oil.
- b. *Auxiliary Lube Oil Pump*, merupakan pompa lube oil yang digerakkan oleh tenaga listrik, beroperasi apabila tekanan dari main pump turun.
- c. *Emergency Lube Oil Pump*, merupakan pompa yang beroperasi jika kedua pompa diatas tidak mampu menyediakan lube oil.



Gambar 2.9 Lube Oil System  
 (sumber : Power Plant Academy, PJB UP Gresik)

## 5. Cooling System

Sistem pendingin yang digunakan pada turbin gas adalah air dan udara. Udara dipakai untuk mendinginkan berbagai komponen pada section dan bearing. Komponen-komponen utama dari cooling system adalah:

1. Off base Water Cooling Unit
2. Lube Oil Cooler

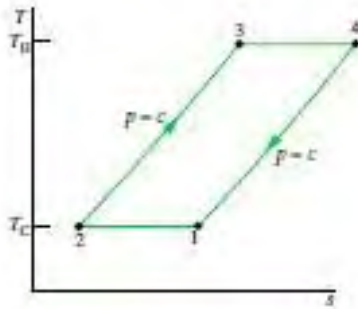


3. *Main Cooling Water Pump*
4. *Temperatur Regulation Valve*
5. *Auxiliary Water Pump*
6. *Low Cooling Water Pressure Swich*

## 2.2 Siklus pada Turbin Gas

Tiga siklus turbin gas yang dikenal secara umum yaitu:

### A. Siklus Ericson



Gambar 2.10 *Ericson Cycle*  
(sumber : *Fundamental Engineering Thermodynamics 5<sup>th</sup>*  
 , *Moran-Saphiro*)

Merupakan siklus mesin kalor yang dapat balik (reversible) yang terdiri dari dua proses isotermis dapat balik (reversible isothermic) dan dua proses isobarik dapat balik (reversible isobaric). Proses perpindahan panas pada proses isobarik berlangsung di dalam komponen siklus internal (regenerator), dimana efisiensi termalnya adalah :

$$\eta_{th} = 1 - T_c / T_h$$

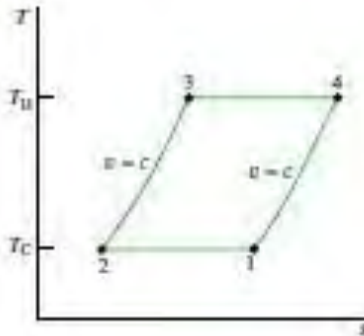
dimana

$T_c$  = temperatur buang

$T_h$  = temperatur panas

### B. Siklus Stirling

Merupakan siklus mesin kalor dapat balik, yang terdiri dari dua proses isotermis dapat balik (isothermal reversible) dengan volume tetap (isovolum). Efisiensi termalnya sama dengan efisiensi termal pada siklus Ericson.



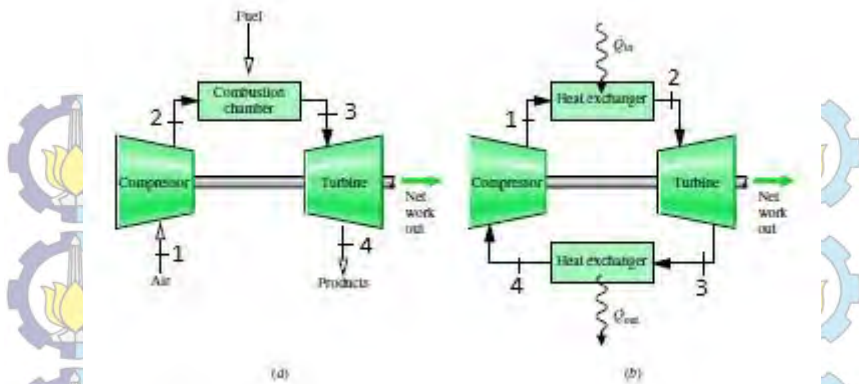
Gambar 2.11 *Stirling Cycle*

(sumber : *Fundamental Engineering Thermodynamics 5<sup>th</sup>*, Moran-Saphiro)

### C. Siklus Brayton

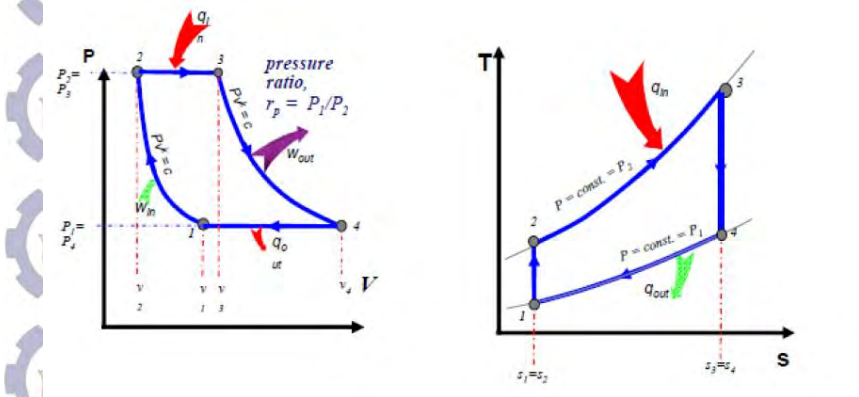
Siklus ini merupakan siklus daya termodinamika ideal untuk turbin gas, sehingga saat ini siklus ini yang sangat populer digunakan oleh pembuat mesin turbine atau manufaktur dalam analisa untuk *upgrade performance*. Siklus Brayton ini terdiri dari proses kompresi isentropik yang diakhiri dengan proses pelepasan panas pada tekanan konstan. Pada siklus Bryton tiap-tiap keadaan proses dapat dianalisa secara berikut:





Gambar 2.12 Simple Gas Turbine (a) Open Cycle (b) Closed Cycle

(sumber : Fundamental Engineering Thermodynamics 5<sup>th</sup>, Moran-Saphiro)



Gambar 2.13 Siklus pada Simple Gas Turbine

(a) P-V diagram (b) T-S diagram

(sumber : Dolok, 2009)

Keterangan :

**a. Proses (1-2) kompresi isentropik**

Udara atmosfer masuk ke dalam sistem turbin gas melalui sisi inlet kompresor. Oleh kompresor, udara dikompresikan sampai tekanan tertentu diikuti dengan volume ruang yang menyempit. Proses ini tidak diikuti dengan perubahan entropi, sehingga disebut proses isentropik. Proses ini ditunjukkan dengan angka 1-2 pada kurva di atas.

Karena proses (1-2) merupakan proses isentropik, maka :

$$\begin{aligned}T_1^k P_1^{1-k} &= T_2^k P_2^{1-k} \\ \frac{T_2}{T_1} &= \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1-k}{k}} \\ \frac{T_2}{T_1} &= \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \dots\dots\dots(1)\end{aligned}$$

Kerja yang dibutuhkan kompresor, dalam hal ini adalah sebagai berikut ;

$$\dot{W}_{\text{kompresor}} = \dot{m}_{\text{udara}} (h_2 + h_1) \dots\dots\dots(2)$$

**b. Proses (2-3) pembakaran isobarik**

Pada tahap 2-3, udara terkompresi masuk ke ruang bakar. Bahan bakar diinjeksikan ke dalam ruang bakar, dan diikuti dengan proses pembakaran bahan bakar tersebut. Energi panas hasil pembakaran diserap oleh udara ( $q_{\text{in}}$ ), meningkatkan temperatur udara, dan menambah volume udara. Proses ini tidak mengalami kenaikan tekanan udara, karena udara hasil proses pembakaran bebas berekspansi ke sisi turbin. Karena tekanan yang konstan inilah maka proses ini disebut isobarik.

Suatu bentuk sederhana dari persamaan tingkat keadaan gas ideal diperoleh apabila  $C_p$  konstan, dalam hal ini juga diketahui bahwa  $C_v$  juga konstan, maka diperoleh persamaan tingkat keadaan sebagai berikut ;

$$\begin{aligned}Pv &= RT \\ u_2 &= C_v \cdot T_2 \\ h_2 &= C_p \cdot T_2 \dots\dots\dots(3)\end{aligned}$$



Dengan mengasumsikan tidak ada *loss* pada perpindahan kalor dalam artian kalor terserap penuh dan pada *gas turbine* tidak ada energi yang dibangkitkan. Kesetimbangan massa dan energi pada kondisi *steady state* tunak volumeatur sebagai berikut

$$0 = Q_{cv} + \dot{W} + \dot{m} (h_{in} - h_{out} + \frac{(V_{in}^2 - V_{out}^2)}{2} + ((g (Z_{in} - Z_{out})))$$

Dengan  $Q_{cv}$  merupakan masukan Q yang terdapat pada pembakaran yang dihasilkan oleh bahan bakar Q , yang dihasilkan bahan bakar didapat dari persamaan ;

$$\dot{m}_{\text{bahan bakar}} = \frac{Q_{in}}{LHV_{\text{bahan bakar}}}$$

Jadi,dari persamaan diatas diperoleh

$$Q_{in} = LHV_{\text{bahan bakar}} \times \dot{m}_{\text{bahan bakar}} \dots\dots\dots (4)$$

### c. Proses (3-4) ekspansi isentropik

Udara bertekanan yang telah menyerap panas hasil pembakaran, berekspansi melewati turbin. Sudu-sudu turbin yang merupakan nozzle-nozzle kecil berfungsi untuk mengkonversikan energi panas udara menjadi energi kinetik (baca artikel berikut). Sebagian energi tersebut dikonversikan turbin untuk memutar kompresor. Pada sistem pembangkit listrik turbin gas, sebagian energi lagi dikonversikan turbin untuk memutar generator listrik. Sedangkan pada mesin turbojet, sebagian energi panas dikonversikan menjadi daya dorong pesawat oleh sebetuk nozzle besar pada ujung keluaran turbin gas.

$$T_3^k P_3^{1-k} = T_4^k P_4^{1-k}$$

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{1-k}{k}}$$

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{k}{k-1}} \dots\dots\dots (5)$$

Daya yang dibutuhkan turbin, sebagai berikut ;

$$\dot{W}_{\text{turbin}} = (\dot{m}_{\text{udara}} + \dot{m}_{\text{bahan bakar}}) \times (h_3 - h_4) \dots\dots\dots (6)$$

**d. Proses (1-4) pembuangan panas**

Tahap selanjutnya adalah pembuangan udara kembali ke atmosfer. Pada siklus Brayton ideal, udara yang keluar dari turbin ini masih menyisakan sejumlah energi panas. Panas ini diserap oleh udara bebas, sehingga secara siklus udara tersebut siap untuk kembali masuk ke tahap 1-2 lagi.

$$P_v = R T$$

$$u_2 = C_v \cdot T_4$$

$$h_2 = C_p \cdot T_4 \dots\dots\dots (7)$$

Pembuangan kalor pada tekanan konstan ( $P = c$ ). Kalor yang dilepas;

$$Q_{\text{out}} = (\dot{m}_{\text{udara}} + \dot{m}_{\text{bahan bakar}}) \times (h_4 - h_1) \dots\dots\dots (8)$$

## **2.3 Air Fuel Ratio, Spesific Fuel Consumption, Heat Rate dan Effisiensi**

### **2.3.1 Air Fuel Ratio**

Bahan Bakar ( natural gas ) yang hendak dimasukkan kedalam ruang bakar haruslah dalam keadaan yang mudah terbakar, hal tersebut agar bisa didapatkan efisiensi turbin gas yang maksimal. Campuran bahan bakar yang belum sempurna akan sulit dibakar oleh percikan bunga api dari *spark plug*. Bahan bakar tidak dapat terbakar tanpa adanya udara ( $O_2$ ), tentunya dalam keadaan yang homogen. Bahan bakar atau natural gas yang dipakai dalam pembakaran sesuai dengan ketentuan atau aturan, sebab bahan bakar yang melimpah pada ruang bakar justru tidak meningkatkan tenaga yang dihasilkan turbin gas tersebut namun akan merugikan turbin gas sendiri. Perbandingan campuran udara dan bahan bakar sangat dipengaruhi oleh pemakaian bahan bakar. Perbandingan udara dan bahan bakar dinyatakan dalam bentuk volume atau berat dari bagian udara dan natural gas. *Air Fuel Ratio* adalah faktor yang



mempengaruhi kesempurnaan proses pembakaran didalam ruang bakar. Merupakan komposisi campuran natural gas dan udara. Misalkan AFR bernilai 14,7 artinya campuran terdiri dari 1 natural gas dan 14,7 udara biasa disebut Stoichiometry. Air fuel ratio dapat dicari menggunakan persamaan :

$$(A/F) = \frac{\dot{m}_{udara}}{\dot{m}_{bahan\ bakar}} \dots\dots\dots (9)$$

### 2.3.2 Spesific Fuel Consumption

Jumlah bahan bakar yang dikonsumsi (berat) untuk menghasilkan satu satuan daya dalam satu satuan waktu. Di mesin piston, SFC adalah sama dengan rasio massa bahan bakar / poros tenaga kuda. Dalam mesin turbin gas, SFC adalah sama dengan rasio massa bahan bakar / dorongan. Kondisi terbaik adalah ketika nilainya minimum. Nilai SFC menurun dengan tinggi saat dalam kondisi suhu dingin.

$$SFC = \frac{\text{massa aliran bahan bakar}}{\text{daya netto instalasi}}$$

$$SFC = \frac{\dot{m}_{bahan\ bakar}}{W_{nett}} \dots\dots\dots (10)$$

SFC dalam satuan  $\frac{kg}{kWh}$

### 2.3.3 Heat Rate

Besar energi yang digunakan oleh unit pembangkitan dalam memproduksi satu unit ouput atau per kWh -nya.

$$GT\ Heat\ Rate = \frac{\dot{m}_{bb} \cdot HHV_{(bb)}}{Power\ Product} \dots\dots\dots (11)$$

### 2.3.4 Effisiensi

#### a) Effisiensi Kompresor

$$\eta_{kompresor} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} \times 100\ \% \dots\dots\dots (12)$$

## b) Effisiensi Turbin

$$\eta_{\text{turbin}} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4s}} \times 100 \% \quad \dots\dots\dots (13)$$

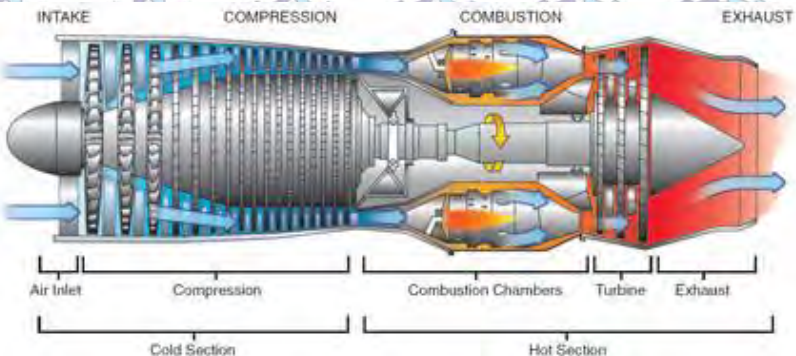
## c) Effisiensi Siklus (GT Effisiensi)

$$\eta_{\text{siklus}} = \frac{W_{\text{netto}}}{Q_{\text{in}}} \times 100 \% \quad \dots\dots\dots (14)$$

## d) Effisiensi Generator

$$\eta_{\text{generator}} = \frac{\text{Beban}}{W_{\text{netto}}} \times 100 \% \quad \dots\dots\dots (15)$$

## 2.4 Prinsip Kerja Turbin Gas



Gambar 2.14 Gas Turbine Principle  
(sumber : Inisiator Aceh Power Investment-Gas Turbine System)

Secara umum proses yang terjadi pada suatu sistim turbine gas adalah sebagai berikut:

1. Pemampatan (compression) udara di hisap dan dimampatkan
2. Pembakaran (combustion) bahan bakar dicampurkan ke dalam ruang bakar dengan



udara kemudian di bakar.

3. Pemuaian (expansion) gas hasil pembakaran memuai dan mengalir ke luar melalui nozel (nozzle)

4. Pembuangan gas (exhaust) gas hasil pembakaran dikeluarkan lewat saluran pembuangan.

Pada kenyataannya, tidak ada proses yang selalu ideal, tetap terjadi kerugian-kerugian yang dapat menyebabkan turunnya daya yang dihasilkan oleh turbin gas dan berakibat pada menurunnya performansi turbin gas itu sendiri. Kerugian-kerugian tersebut dapat terjadi pada ketiga komponen sistem turbin gas. Sebab-sebab terjadinya kerugian antara lain:

- Adanya gesekan fluida yang menyebabkan terjadinya kerugian tekanan (pressure losses) di ruang bakar.
- Adanya kerja yang berlebih waktu proses kompresi yang menyebabkan terjadinya gesekan antara bantalan turbin dengan angin.
- Berubahnya nilai  $C_p$  dari fluida kerja akibat terjadinya perubahan temperatur dan perubahan komposisi kimia dari fluida kerja.
- Adanya mechanical loss, dsb.

Untuk memperkecil kerugian ini hal yang dapat kita lakukan antara lain dengan perawatan (maintanance) yang teratur atau dengan memodifikasi peralatan yang ada.

## **2.5 Pemeliharaan pada Turbin Gas**

Pemeliharaan Turbin Gas adalah suatu kegiatan pekerjaan perawatan yang dilakukan terhadap peralatan / instalasi Turbin Gas dengan tujuan agar supaya peralatan / instalasi tersebut dapat dioperasikan secara maksimal, andal, efisien, aman dan dapat mencapai umur pakai (life time) sesuai dengan yang direncanakan.

Pemeliharaan akan diperlukan karena setiap peralatan yang dioperasikan akan mengalami kerusakan.

Faktor-faktor penyebab kerusakan diantaranya adalah :

- Design dan material
- Pengoperasian
- Pemeliharaan
- Kondisi lingkungan

Program pemeliharaan yang berhasil selain akan memperlambat terjadinya kerusakan, juga akan dapat meningkatkan kemampuan dari peralatan / instalasi yang dipelihara.

Efisiensi Turbin Gas sangat mempengaruhi daya mampu unit PLTG. Oleh karenanya stop berkala (periodic shut-down) akan hilangnya kesempatan produksi yang tidak direncanakan terlebih dahulu dan mungkin juga akan berarti suatu kondisi yang berbahaya. Stop terencana (scheduled shut-down) harus dikoordinasikan dengan unit pembangkit lainnya sehingga tidak terjadi kekurangan cadangan unit pembangkit. Turbin Gas memerlukan Periodic Inspection, perbaikan dan penggantian parts-nya.

### **2.5.1 Pemeliharaan selama Unit Beroperasi**

Merupakan pengamatan yang terus menerus selama Turbin Gas dioperasikan. Pengamatan ini biasanya dilaksanakan setiap hari, setiap minggu atau setiap bulan dan setiap tahun.

Bagian-bagian yang diamati diantaranya :

- Tekanan bahan bakar pada Fuel Nozzle
- Differential Pressure pada filter-filter
- Exhaust Gas Temperature
- Kebocoran-kebocoran.
- Vibrasi
- Tingkat kekotoran Kompresor
- dll.



## **2.5.2 Pemeliharaan selama Unit Stop**

### **2.5.2.1 Fuel Nozzle Inspection.**

Inspection ini adalah membuka, melepas serta membersihkan Fuel Nozzle dan memeriksa bagian dalam Combustor Basket dan Transition Piece melalui lubang tempat memasang Nozzle.

Untuk pemeriksaan pertama (terhitung sejak Turbin Gas dioperasikan sesudah erection atau sesudah Major Inspection), pemeriksaan Fuel Nozzle ini selambat-lambatnya-lambatnya dilaksanakan setelah mencapai 50 jam operasi. Apakah dari pemeriksaan pertama ini tidak terlihat adanya kelain-kelain maka pemeriksaan selanjutnya bersama dengan Combustor Section Inspection.

### **2.5.2.2 Combustor Section Inspection**

Bagian pekerjaan yang termasuk dalam Combustor Section Inspection adalah membongkar, memeriksa dan memperbaiki Fuel Nozzle, Combustor Basket, Transition Pieces dan komponen lain yang berada didalam Combustor Chamber. Bagian-bagian yang dibuka tersebut harus dibersihkan dengan teliti, diperiksa dan diperbaiki.

Pada kesempatan ini juga diperiksa sudu-sudu turbin tingkat pertama yang dapat diperiksa dari lubang tempat pemasangan Transition Pieces.

### **2.5.2.3 Turbin Section Inspection**

Inspection ini biasa disebut juga sebagai Hot Gas Path Inspections, yang meliputi Combustor Section Inspection ditambah dengan memeriksa / memperbaiki bagian dalam Turbin Gas dengan terlebih dahulu membuka Combustor Chamber Cylinder.

Sudu-sudu turbin dilepaskan dari rotornya kemudian dibersihkan dan diperbaiki. Diaphragma dan seal labirin juga dilepas, dibersihkan dan diperbaiki. Dianjurkan juga agar bantalan aksial (Thrust Bearing) serta bantalan journal (Journal Bearing) dibuka, diperiksa dan diperbaiki.

### 2.5.2.4 Major Inspection

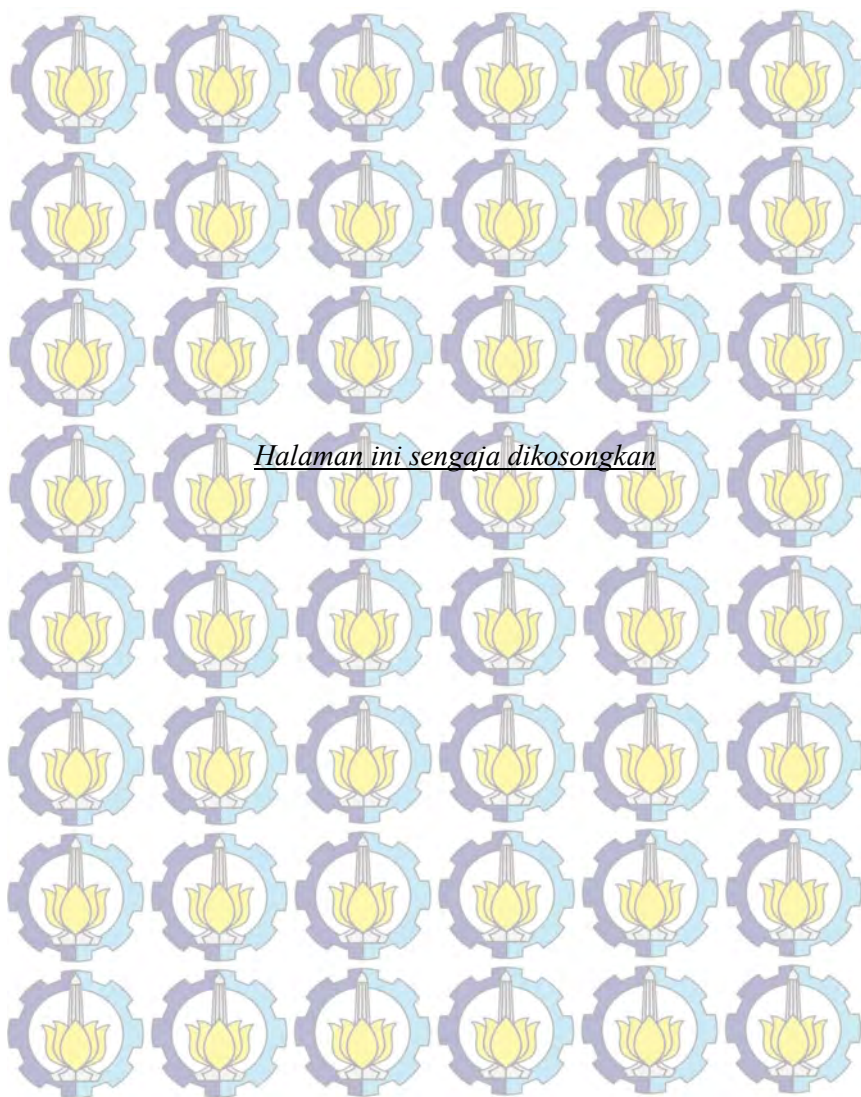
Major Inspection adalah pemeriksaan dan perbaikan menyeluruh yang dilakukan terhadap semua komponen unit PLTG (Turbin Gas, Kompresor, Peralatan bantu dll). Pekerjaan yang dilaksanakan mencakup pekerjaan Combustor Section Inspection, Turbine Section Inspection, ditambah dengan membuka Compresor Casing, melepas sudu-sudu kompresor untuk diperiksa atau diperbaiki.

Diaphragma Kompresor, Seal labirin, bantalan-bantalan juga dilepas, dibersihkan diperiksa dan diperbaiki. Dalam pelaksanaan Major Inspection ini juga dilakukan alignment (penyetelan-penyetelan) secara menyeluruh. Kriteria pemeriksaan, perbaikan dan penggantian dapat dilihat dari Service Bulletin yang dikeluarkan oleh pabrik pembuat atau dari buku manual.

| UNIT                           | SIKLUS 1 |      |       |    | SIKLUS 2 |      |       |    | SIKLUS 3 |      |       |    | SIKLUS 4 |      |       |    |    |    |
|--------------------------------|----------|------|-------|----|----------|------|-------|----|----------|------|-------|----|----------|------|-------|----|----|----|
| PLTU                           | SI       | ME   | SI    | SE | SI       | ME   | SI    | SE | SI       | ME   | SI    | SE | SI       | ME   | SI    | SE |    |    |
| PLTG                           | CI       | HGPI | CI    | MI | CI       | HGPI | CI    | MI | CI       | HGPI | CI    | MI | CI       | HGPI | CI    | MI |    |    |
| PLTGU                          | CI       | TI   | CI    | MI | CI       | TI   | CI    | MI | CI       | TI   | CI    | MI | CI       | TI   | CI    | MI |    |    |
| PLTGU                          | TC/TA    |      | TB/TA |    | TC/TA    |      | TB/TA |    | TC/TA    |      | TB/TA |    | TC/TA    |      | TB/TA |    |    |    |
| PLTD                           | TO       | SO   | TO    | MO | TO       | SO   | TO    | MO | TO       | SO   | TO    | MO | TO       | SO   | TO    | MO |    |    |
| PLTA                           | AI       | AI   | GI    | AI | AI       | MO   | AI    | AI | GI       | AI   | AI    | MO | AI       | AI   | GI    | AI | AI | MO |
| SIKLUS PEMELIHARAAN BESAR (OH) |          |      |       |    |          |      |       |    |          |      |       |    |          |      |       |    |    |    |

Gambar 2.15 Siklus Pemeliharaan Turbin Gas  
(sumber : Power Plant Academy, PJB UP Gresik)

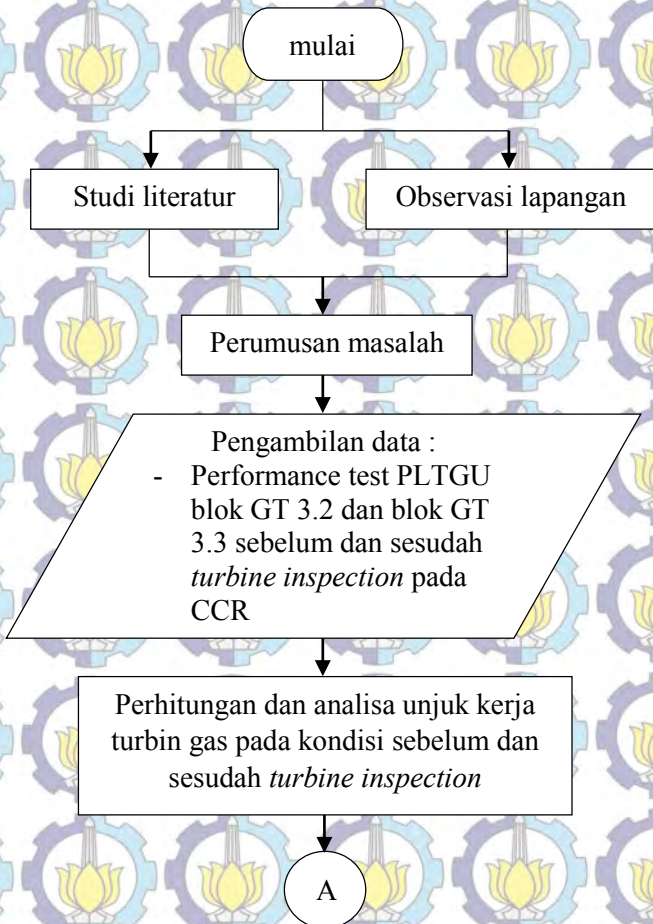




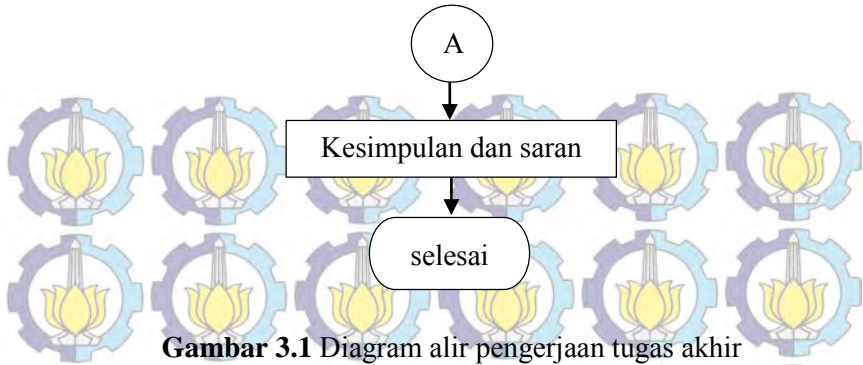
## BAB III METODOLOGI

### 3.1 Metodologi Pengerjaan Tugas Akhir

Dalam pengerjaan tugas akhir ini dilakukan dengan empat tahap yang digambarkan pada diagram alir berikut :







### **3.2 Penjelasan diagram alir pengerjaan tugas akhir**

Tugas akhir Analisa Perbandingan Performa Turbin Gas Sebelum dan Sesudah *Turbine Inspection* Dengan Variasi Beban di PLTGU Blok GT 3.2 dan GT 3.3 PT. PJB UP Gresik dalam penyelesaiannya memiliki metode dan tahapan sebagai berikut :

#### **3.2.1 Tahap Identifikasi**

Pada tahap awal identifikasi dilakukan identifikasi lapangan dan studi literatur untuk menentukan rumusan masalah dan tujuan dalam pembuatan Tugas Akhir.

#### **3.2.2 Studi Literatur dan Observasi Lapangan**

Setelah melakukan identifikasi masalah, dan menentukan topik selanjutnya dikaji ulang untuk memastikan bahwa topik relevan untuk dijadikan penelitian tugas akhir. Studi literatur adalah langkah pengkajian topik tugas akhir. Pengkajian ini meliputi studi pustaka yang berkaitan dengan turbin gas yang diperoleh dari buku *Performance Test PLTGU blok GT 3.2 dan GT 3.3* serta berbagai sumber *text book* seperti *Power Plant Engineering* oleh Black & Veatch, *Fundamental of Engineering Thermodynamics* oleh Michael J. Moran dan Howard N. Shapiro, *Fundamental of Thermodynamics* oleh Claus Borgnakke dan Richard E. Sonntag, dan beberapa sumber lain. Selain itu juga dikaji berdasarkan penelitian terdahulu.

Observasi dan identifikasi lapangan juga dilakukan guna mengetahui lebih lanjut mengenai permasalahan pokok yang akan dianalisis sebagai topik tugas akhir. Turbin gas adalah topik yang dianalisis pada tugas akhir ini. Analisis dilakukan pada unjuk kerja dan operasi turbin gas secara termodinamika.

### **3.2.3 Perumusan Masalah**

Setelah melakukan observasi pada PLTGU PT PJB UP Gresik dan melakukan berbagai studi literatur, maka dapat dirumuskan masalah, dengan topik dan objek penelitian tugas akhir turbin gas PLTGU Blok II dan III atau sering disebut GT 3.2 dan GT 3.3 dalam operasi PLTGU. Tugas akhir ini, mengangkat permasalahan bagaimana unjuk kerja turbin gas secara termodinamika pada keadaan sebelum *turbine inspection* dan sesudah *turbine inspection*.

### **3.2.4 Pengumpulan data dan perhitungan**

Pada tahap ini data dikumpulkan berbagai data sebagai sumber informasi dari analisis unjuk kerja GT 3.2 dan GT 3.3.

#### **A. Data *commisioning* dan unjuk kerja**

Data *commisioning* turbin gas GT 3.2 dan GT 3.3 diambil pada buku performance test tahun 1994 PLTGU PT. PJB UP Gresik. Dari data ini didapatkan data *heat balance commisioning* turbin gas blok II dan III PT. PJB UP Gresik

#### **B. Data operasi sebelum dan sesudah *turbine inspection***

Data operasi ini diambil pada performance test sebelum dan sesudah *turbine inspection* yang dilakukan pada tanggal 01 November - 22 November 2014 (pada GT 3.3) dan pada tanggal 09 Januari - 27 Januari 2015 (pada GT 3.2)

Data yang diambil pada saat performance test adalah data yang diambil ketika turbin dalam kondisi tes dan dikondisikan semua drain valve, by pass valve dan isolation valve dalam keadaan tertutup, proses pengambilan data pada saat kondisi stabil dan tidak ada adjustment parameter yang sedang berlangsung. Hal



ini dimaksudkan agar hasil evaluasi turbin gas dapat mendekati kondisi yang sebenarnya.

Data yang diambil dalam data operasi dan kondisi tes pada instalasi turbin gas adalah :

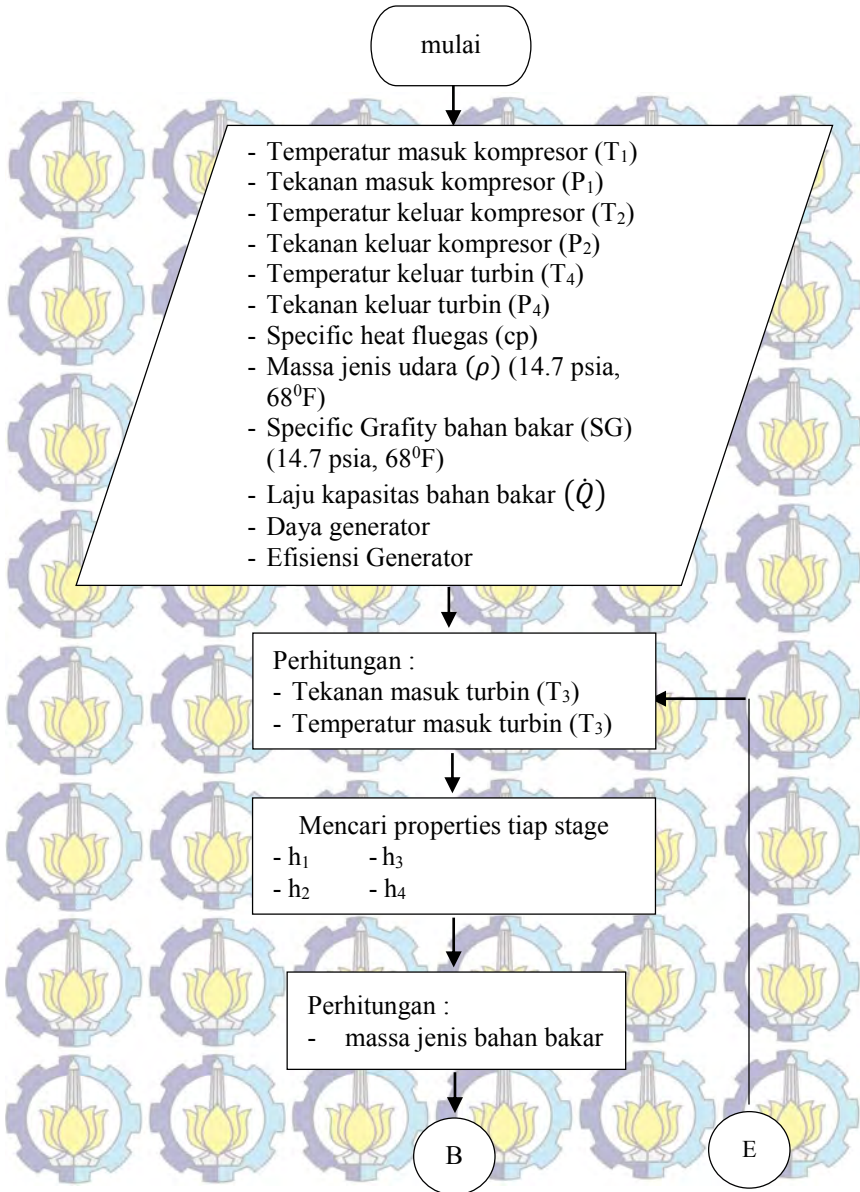
- Temperatur udara masuk kompresor ( $T_1$ )
- Tekanan udara masuk kompresor ( $P_1$ )
- Temperatur udara keluar kompresor ( $T_2$ )
- Tekanan udara keluar kompresor ( $P_2$ )
- Temperatur flue gas keluar turbin gas ( $T_4$ )
- Tekanan flue gas keluar turbin gas ( $P_4$ )
- Laju kapasitas bahan bakar ( $\dot{Q}$ )
- Specific gravity bahan bakar (SG)
- HHV bahan bakar
- Kalor Spesifik flue gas ( $C_p$ )

### 3.2.5 Perhitungan dan Analisis

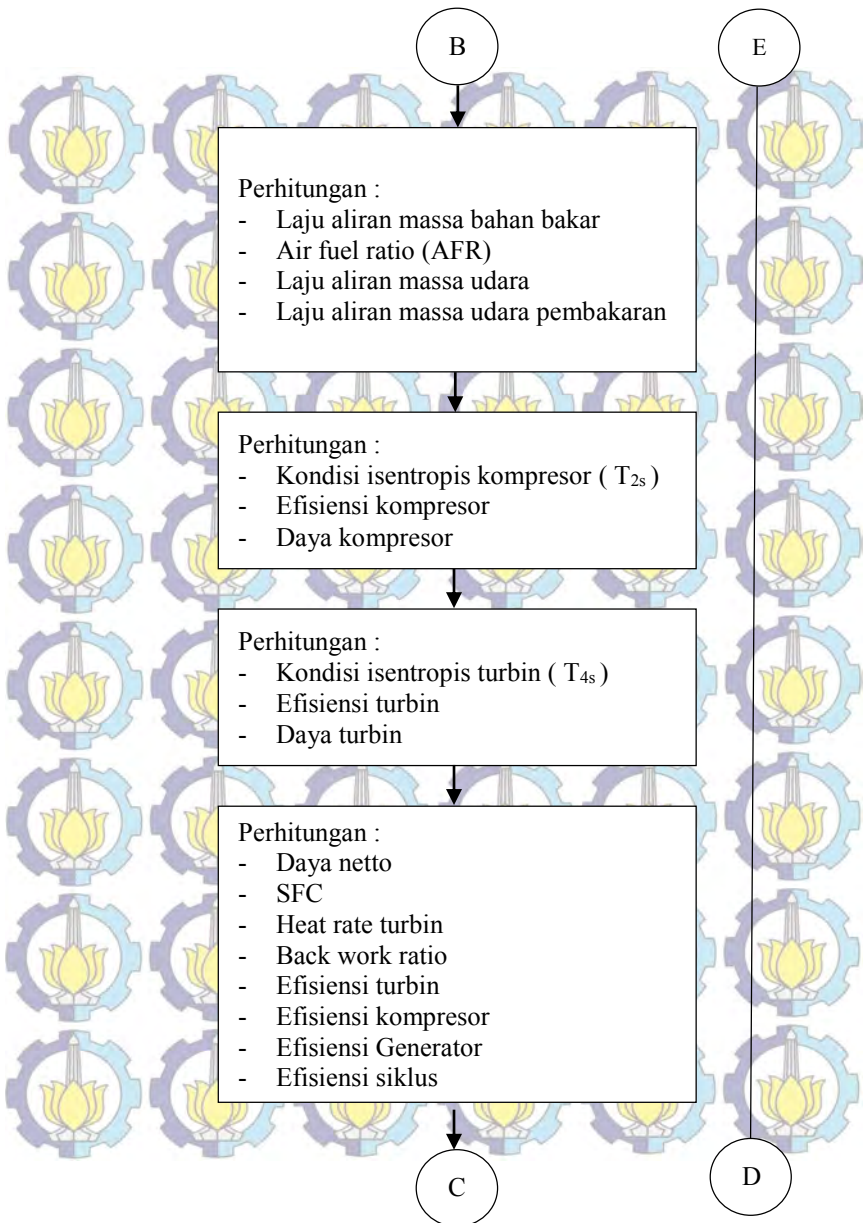
Pada tahap ini dilakukan perhitungan secara termodinamika untuk mengetahui perbandingan unjuk kerja turbin gas pada kondisi sebelum dan sesudah *turbine inspection* yang akan dijelaskan pada sub bab selanjutnya.

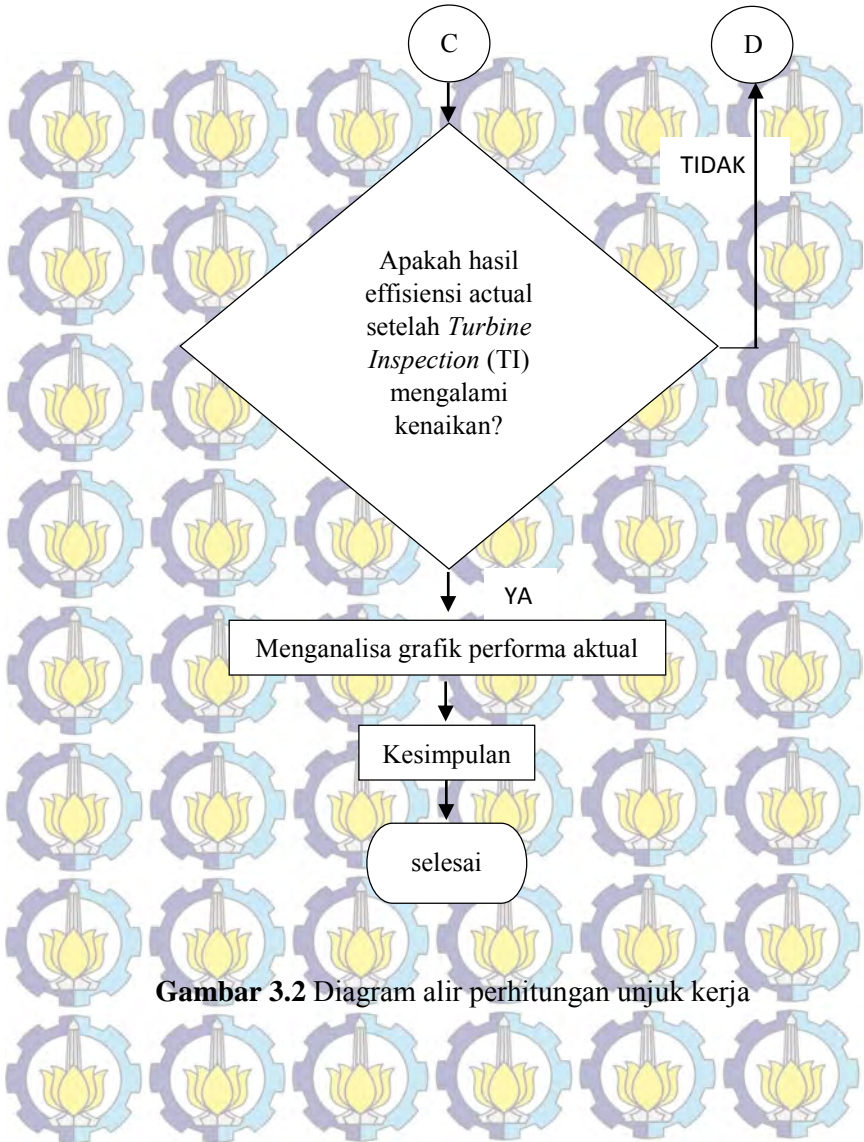
### 3.3 Metodologi Perhitungan Unjuk Kerja

Metodologi untuk mengetahui unjuk kerja turbin gas GT 3.2 dan GT 3.3 adalah ditinjau dari termodinamika dengan metode perhitungan seperti diagram alir berikut :



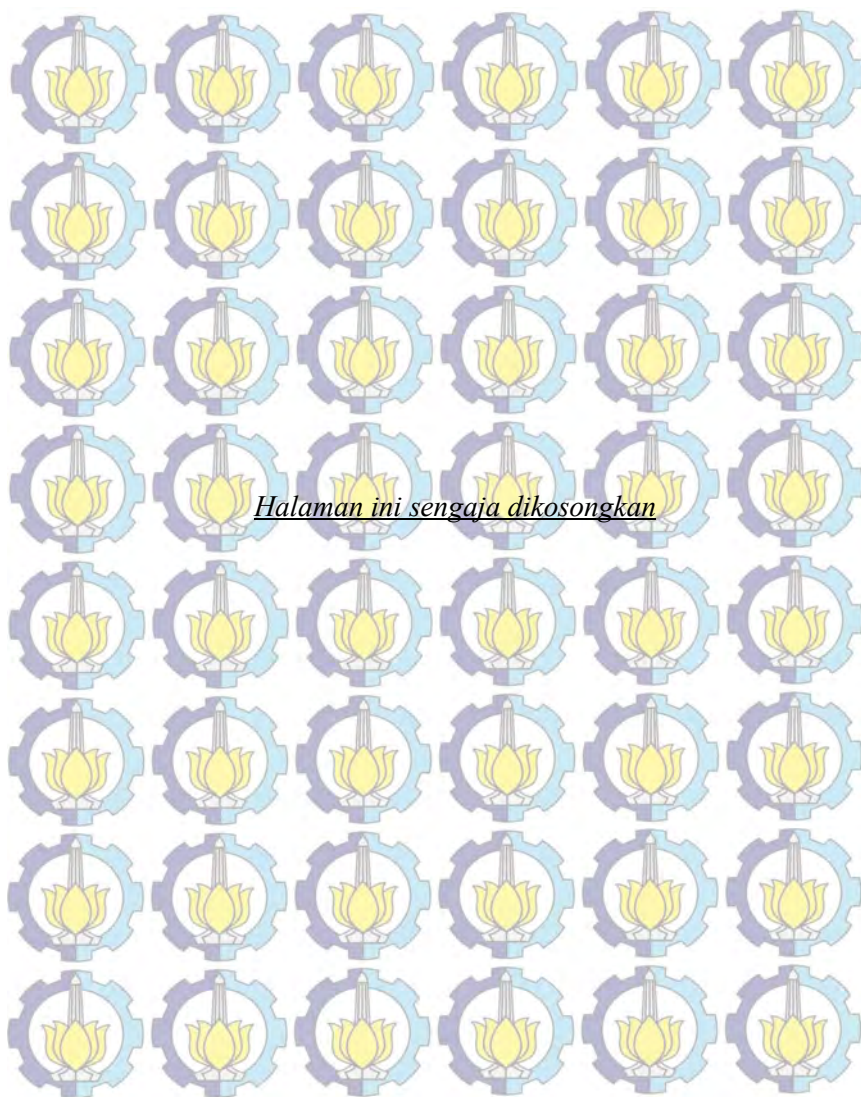






**Gambar 3.2** Diagram alir perhitungan unjuk kerja





## **BAB IV**

### **ANALISA DAN PERHITUNGAN**

Pada bab berikut akan dijabarkan langkah-langkah perhitungan unjuk kerja turbin gas dan hasil perhitungan perbandingan performa turbin gas sebelum dan sesudah *turbine inspection*, dengan menggunakan :

- 1) Data operasi sebelum dan sesudah *turbine inspection* pada tiap variasi beban.
- 2) Data hasil perhitungan pada beban yang berbeda-beda dengan menggunakan analisa termodinamika.

#### **4.1 Data Hasil Pengamatan**

Setelah dilakukan pengamatan di *plant* didapatkan data dan blok diagram turbin gas PLTGU blok GT 3.2 dan GT 3.3 seperti yang dilampirkan di lampiran untuk data operasi turbin gas sebelum dan sesudah *turbine inspections*.

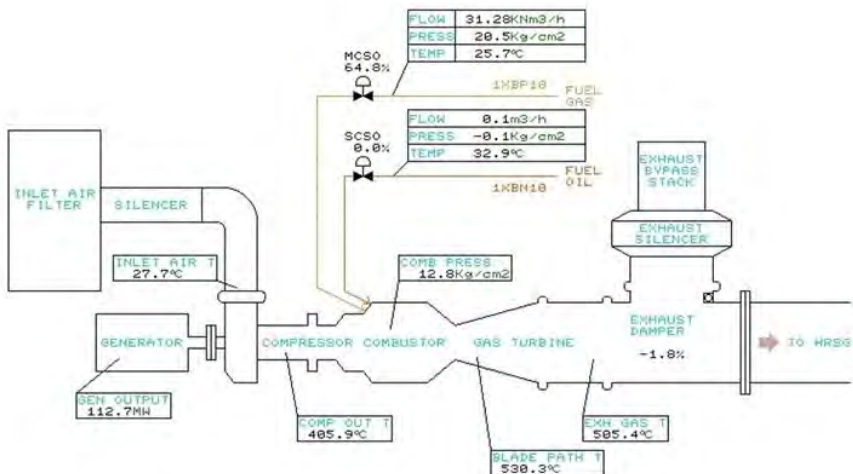
#### **4.2 Perhitungan performa turbin gas GT 3.2 dan GT 3.3 PLTGU PT.PJB UP Gresik sebelum dan sesudah *turbine inspection***

Pada sub bab ini akan dijabarkan cara perhitungan performa turbin gas GT 3.2 PLTGU PT.PJB UP Gresik . Data yang digunakan dalam contoh perhitungan adalah data operasi PLTGU blok GT 3.2 sebelum *turbine inspection*, pada bulan Januari 2015 pada variasi beban 50 MW.

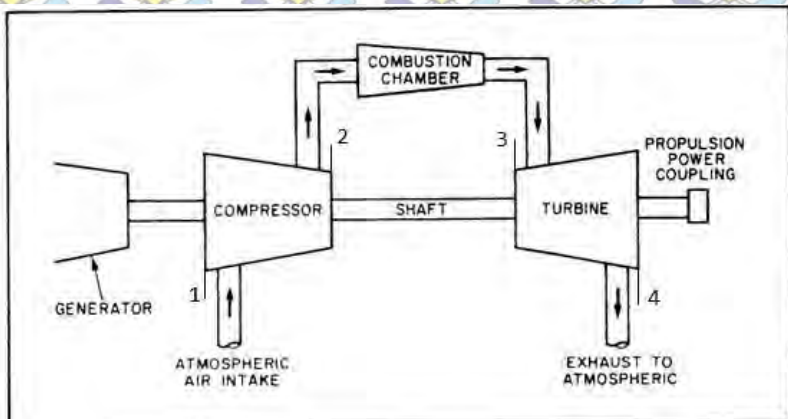
##### **4.2.1 Perhitungan Properties Pada Tiap Titik**

Untuk mempermudah dalam melakukan perhitungan, ada baiknya kita ketahui properties di tiap-tiap titik pada skema turbin gas. Adapun skema turbin gas itu sendiri serta data pengoperasian adalah sebagai berikut :





Gambar 4.1 Gas Turbine Operation Sample  
(sumber : Power Plant Academy, PJB UP Gresik)



Gambar 4.2 Gas Turbine Overview  
(sumber : Power Plant Academy, PJB UP Gresik)

Metode perhitungan didasarkan pada beberapa asumsi untuk menyederhanakan perhitungan,

Asumsi :

- 1) Setiap komponen yang dianalisa dalam keadaan *steady state*
- 2) Proses yang terjadi pada turbin dan kompresor merupakan proses isentropik
- 3) Energi kinetik dan energi potensial diabaikan
- 4) Bahan bakar (natural gas) yang masuk didapatkan dari pasokan yang di *supply* oleh 6 produsen penyedia natural gas.
- 5) Proses yang terjadi pada turbin gas tidak dijabarkan secara detail karena mengacu pada data operasi atau *performance test sheet* yang ada.
- 6) Perhitungan performa turbin gas didasarkan pada kalor yang masuk dan kalor yang keluar pada system saja, tidak menghitung perpindahan panas yang terjadi pada setiap state yang ada didalam turbin gas.

#### **4.2.2 Contoh Perhitungan Properties Pada Tiap Titik dan Perhitungan Performa Turbin Gas**

Dalam membandingkan perbedaan performa turbin gas sebelum dan sesudah *turbine inspection* kita dapat menyederhanakannya dengan hanya menggunakan salah satu contoh perhitungan. Kita akan mengambil contoh perhitungan dalam data sebelum *turbine inspection* pada beban 50 MW PLTGU GT 3.2 pada bulan Januari 2015.

##### **4.2.2.1 Perhitungan Properties di Tiap Titik**

Untuk properties yang diketahui pada beban 50 MW sebelum *turbine inspection* GT 3.2 bisa dilihat pada table dibawah ini. Dari tabel tersebut kita bisa mencari properties untuk setiap stage yang dibutuhkan dalam perhitungan performa turbin gas.



Tabel 4.1 Data operasi sebelum TI.GT 3.2

| <b>Data Operasi</b>                     |                     |   |
|---|---------------------|---|
| <b><i>Input</i></b>                     | <b><i>Value</i></b> | <b><i>Unit</i></b>                      |
| Laju Aliran Bahan Bakar ( $\dot{Q}$ )   | 19.97               | $\text{kNm}^3/\text{h}$                 |
| Temperatur Masuk Kompresor ( $T_1$ )    | 29.70               | $^{\circ}\text{C}$                      |
| Tekanan Masuk Kompresor ( $P_1$ )       | 14.70               | Psi                                     |
| Temperatur Keluar Kompresor ( $T_2$ )   | 362.33              | $^{\circ}\text{C}$                      |
| Temperatur Keluar Turbin ( $T_4$ )      | 475.00              | $^{\circ}\text{C}$                      |
| Tekanan Keluar Turbin ( $P_4$ )         | 1.05                | $\text{kg}/\text{cm}^2$                 |
| HHV                                     | 1071.11             | BTU/SCF                                 |
| Efisiensi Generator                     | 0.97                |   |
| Daya Generator                          | 50.50               | MW                                      |
| $k_{\text{Combustion Product}}$         | 1.30                |   |
| <i>Specific Heat Combustion Product</i> | 1.30057             | $\text{kJ}/\text{kg}, ^{\circ}\text{K}$ |

Untuk mempermudah dalam melakukan perhitungan, maka dilakukan konversi terlebih dahulu ke dalam satuan baku *metric units*, sebagai berikut :

Tabel 4.2 Konversi Data operasi sebelum TI.GT 3.2

| <b>Data Operasi</b>                     |                     |   |
|---|---------------------|---|
| <b><i>Input</i></b>                     | <b><i>Value</i></b> | <b><i>Unit</i></b>                      |
| Laju Aliran Bahan Bakar ( $\dot{Q}$ )   | 0.00555             | $\text{kNm}^3/\text{s}$                 |
| Temperatur Masuk Kompresor ( $T_1$ )    | 302.97              | $^{\circ}\text{K}$                      |
| Tekanan Masuk Kompresor ( $P_1$ )       | 100.1295            | kPa                                     |
| Temperatur Keluar Kompresor ( $T_2$ )   | 635.33              | $^{\circ}\text{K}$                      |
| Temperatur Keluar Turbin ( $T_4$ )      | 748                 | $^{\circ}\text{K}$                      |
| Tekanan Keluar Turbin ( $P_4$ )         | 102.29              | kPa                                     |
| HHV                                     | 46864.48            | $\text{kJ}/\text{kg}$                   |
| Efisiensi Generator                     | 0.97                |   |
| Daya Generator                          | 50500               | kW                                      |
| $k_{\text{Combustion Product}}$         | 1.30                |   |
| <i>Specific Heat Combustion Product</i> | 1.30057             | $\text{kJ}/\text{kg}, ^{\circ}\text{K}$ |

a. State 1

Pada state ini udara dari luar (atmosfir) masuk melalui *inlet air filter* menuju ke kompresor. Dari data temperature yang ada pada tabel operasi, maka akan didapatkan enthalphy.

$$T_1 = 302.97 \quad ^\circ\text{K}$$

$$P_1 = 100.1295 \quad \text{kPa}$$

Untuk mencari entalpi fluida kita menggunakan tabel termodinamika. Pada kali ini menggunakan tabel termodinamika dari “Fundamental of Engineering Thermodynamics” 5th edition karangan Michael J. Moran dan Howard N. Saphiro pada bagian A-22 *Ideal Gas Properties of Air*. (terdapat pada lampiran) Dengan menggunakan interpolasi,

$$h_1 = \frac{(h_{\text{atas}} - h_{\text{bawah}})}{(T_{\text{atas}} - T_{\text{bawah}})} \times (T_1 - T_{\text{bawah}}) + h_{\text{bawah}}$$

$$h_1 = \frac{(300.19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 305.22 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})}{(300 \text{ K} - 305 \text{ K})} \times (302.97 \text{ } ^\circ\text{K} - 305 \text{ } ^\circ\text{K}) +$$

$$305.22 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_1 = 301.59 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

b. State 2

Pada titik ini udara yang masuk ke kompresor tadi akan di kompresikan keluar menuju ke ruang bakar, dimana fluida udara tersebut mempunyai tekanan dan temperature yang tinggi. Dari data temperature yang ada pada tabel operasi, maka akan didapatkan enthalphy.

$$T_2 = 635.33 \quad ^\circ\text{K}$$



Untuk mencari entalpi fluida kita menggunakan tabel termodinamika. Pada kali ini menggunakan tabel termodinamika dari “Fundamental of Engineering Thermodynamics” 5th edition karangan Michael J. Moran dan Howard N. Saphiro pada bagian A-22 *Ideal Gas Properties of Air*. (terdapat pada lampiran)

Dengan menggunakan interpolasi,

$$h_2 = \frac{(h_{\text{atas}} - h_{\text{bawah}})}{(T_{\text{atas}} - T_{\text{bawah}})} \times (T_1 - T_{\text{bawah}}) + h_{\text{bawah}}$$

$$h_2 = \frac{(638.63 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} - 649.22 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}})}{(630 \text{ K} - 640 \text{ K})} \times (635.33 \text{ °K} - 630 \text{ °K}) + 649.22 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$h_2 = 696.81 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Karena, pada state 2 ini berlangsung proses kompresi isentropik maka ;

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\left( \frac{k-1}{k} \right)}$$

$$T_{2s} = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\left( \frac{k-1}{k} \right)}$$

$$= 302.97 \text{ °K} \left( \frac{931.665 \text{ kPa}}{100.1295 \text{ kPa}} \right)^{\left( \frac{1.4-1}{1.4} \right)}$$

$$= 301.87 \text{ °K} (9.3045)^{\left( \frac{1.4-1}{1.4} \right)}$$

$$= 573.0209 \text{ °K}$$

c. State 3

Pada tahapan ini terjadi proses pembakaran di dalam ruang bakar (*combustion chamber*) dan fluida bahan bakar natural gas (bahan bakar) di injeksikan sehingga bercampur dengan udara dan terjadi proses pembakaran. *Flue gas* yang sudah terbentuk akan keluar dari ruang bakar menuju turbin.

Dari data heat balance pada kondisi pembebanan 50 MW didapatkan data tekanan keluar kompresor sebesar 13.8 kg/cm<sup>2</sup> dan tekanan masuk turbin sebesar 13.3 kg/cm<sup>2</sup>. Sehingga pressure drop dapat dicari dengan cara sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Pressure drop} &= \left(1 - \frac{P_3}{P_2}\right) \times 100 \% \\ &= \left(1 - \frac{9.1}{9.5}\right) \times 100 \% \\ &= (1 - 0.957) \times 100\% \\ &= 4.3 \% \end{aligned}$$

Setelah besar pressure drop diketahui, maka besar P<sub>3</sub> dapat di hitung dengan cara sebagai berikut :

$$0.043 = \frac{(P_2 - P_3)}{P_2}$$

$$0.043 = \frac{9.5 - P_3}{9.5}$$

$$0.043 \times 9.5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 9.5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} - P_3$$

$$0.4085 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 9.5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} - P_3$$

$$P_3 = 9.9 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Setelah mendapatkan nilai P<sub>3</sub>, serta dengan menggunakan nilai rasio kalor spesifik, k = 1.3 maka Temperatur masuk turbin dapat dicari. sehingga didapatkan :

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\left(\frac{k-1}{k}\right)}$$

$$T_3 = T_4 \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\left(\frac{k-1}{k}\right)}$$

$$T_3 = 748 \text{ } ^\circ\text{K} \left(\frac{970.89}{102.87}\right)^{\left(\frac{1.3-1}{1.3}\right)}$$



$$= 1257.375 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

Dengan  $c_{p,\text{combustion product}} = 1.30057 \text{ kJ/kg }^{\circ}\text{K}$ , dan  $h = c_p \cdot T_3$  maka :

$$\begin{aligned} h_3 &= 1.30057 \text{ kJ/kg }^{\circ}\text{K} \cdot 1257.375 \text{ }^{\circ}\text{K} \\ &= 1635.226 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

d. State 4

Pada proses ekspansi berlangsung terjadi gesekan antara gas hasil pembakaran dengan sudu-sudu turbin, sehingga temperatur gas buang yang keluar dari turbin menjadi lebih tinggi dari pada gas ideal (isentropis).

Dengan  $c_{p,\text{combustion product}} = 1.30057 \text{ kJ/kg }^{\circ}\text{K}$ , dan  $h = c_p \cdot T_4$  maka :

$$\begin{aligned} T_4 &= 748 \text{ }^{\circ}\text{K} \\ h_4 &= c_{p,\text{combustion product}} \cdot T_3 \\ &= 1.30057 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}} \cdot 748 \text{ }^{\circ}\text{K} \\ &= 972.82 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

Karena, pada state 4 ini berlangsung proses kompresi isentropik maka ;

$$\begin{aligned} T_{4s} &= T_3 \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\left( \frac{k-1}{k} \right)} \\ &= 1257.315 \text{ }^{\circ}\text{K} \left( \frac{100.1295 \text{ kPa}}{961.665 \text{ kPa}} \right)^{\left( \frac{1.4-1}{1.4} \right)} \end{aligned}$$

$$= 664.77 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

#### 4.2.2.2 Perhitungan Performa Turbin Gas

##### a) Perhitungan Kerja yang Dibutuhkan Kompresor ( $\dot{W}_c$ )

Untuk perhitungan  $\dot{W}_c$  pada beban 50 MW sebelum *turbine inspection* kita menggunakan data-data properties pada beban 50 MW sebelum *turbine inspection*.

Dengan memakai persamaan (2) , yakni

$$\dot{W}_{\text{kompresor}} = \dot{m}_{\text{udara}} (h_2 - h_1)$$

Diperlukan hasil perhitungan dari  $\dot{m}_{\text{udara}}$ , maka dapat dicari dengan dengan persamaan ;

$$\dot{m}_{\text{udara}} = A/F \cdot m_{bb}$$

Untuk mendapatkan harga dari  $\dot{m}_{\text{bahan bakar}}$ , maka dapat menggunakan persamaan sebagai berikut ;

$$\dot{m}_{\text{bahan bakar}} = \text{fuel gas flow} \times \rho_{\text{bahan bakar}}$$

Berdasarkan pengujian komposisi bahan bakar, didapat *specific gravity* bahan bakar 0.7504 pada kondisi 14.7 Psia, 68  $^{\circ}\text{F}$ , maka massa jenis bahan bakar dapat dihitung sebagai berikut ;

$$\rho_{\text{udara}} = 1.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ dalam } (14.7 \text{ Psia} , 68^{\circ} \text{ F}) \text{ NTP}$$

$$\rho_{bb} = \text{SG} \cdot \rho_{\text{udara}}$$

$$= 0.75 \times 1.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$= 0.9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Untuk harga properties bahan bakar (natural gas) dan udara yang digunakan pada perhitungan ini, dapat dilihat pada table 4.3



Tabel 4.3 Data properties dari natural gas dan udara

|             | $k$ | $P$      | $C_p$     | $C_v$     |
|-------------|-----|----------|-----------|-----------|
| Udara       | 1.4 | 1.2      | 1.01      | 0.718     |
| Natural Gas | 1.2 | 0.9      | 2.4       | 1.85      |
| Unit        |     | $Kg/m^3$ | $kJ/kg.K$ | $kJ/kg.K$ |

Data harga properties tersebut diambil pada sumber : *Engineeringg Toolbox 2013*, untuk lebih detailnya dapat dilihat pada lampiran

Maka besarnya harga  $\dot{m}_{\text{bahan bakar}}$ , dapat diperoleh

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_{\text{bahan bakar}} &= \text{fuel gas flow} \times \rho_{\text{bahan bakar}} \\
 \dot{m}_{\text{bahan bakar}} &= Q_{bb} \cdot \rho_{bb} \\
 &= 19.97 \frac{km^3}{h} \cdot 0.9 \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{h}{3600 s} \cdot \frac{1000}{k} \\
 &= 4.99 \frac{kg}{s}
 \end{aligned}$$

Sementara untuk perhitungan  $\dot{m}_{\text{udara}}$ , dibutuhkan perhitungan dari Air Fuel Ratio terlebih dahulu, untuk perhitungan AFR dapat di cari dengan persamaan :

$$\begin{aligned}
 \frac{W_{GT,nett}}{W_{gen}} &= (W_T - W_c) - \text{Mechanical Losses} \\
 \frac{Eff_{gen}}{50.47 MW} &= \dot{m}_{\text{fuel gas}} (h_3 - h_4) - \dot{m}_{\text{udara}} (h_2 - h_1) - 1100 \text{ kW} \\
 \frac{0.97}{50.47 MW} &= \dot{m}_{\text{fuel gas}} (h_3 - h_4) - \dot{m}_{\text{udara}} (h_2 - h_1) - 1100 \text{ kW} \\
 \frac{0.97}{50.47 MW} &= [(1 + (A/F)) \dot{m}_{bb} (h_3 - h_4) - (A/F) \dot{m}_{bb} (h_2 - h_1) - 1100 \text{ kW} \\
 52030.92 \text{ kW} &= [(1 + (A/F)) 4.99 \frac{kg}{s} (1635.226 \frac{KJ}{kg} - 972.82 \frac{KJ}{kg}) - (A/F) 4.99 \frac{kg}{s} (696.81 \frac{KJ}{kg} - 301.59 \frac{KJ}{kg}) - 1100 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

$$52030.92 \text{ kW} = (1 + (A/F)) 3305.405 \frac{\text{KJ}}{\text{s}} - (A/F) 1972.15 \frac{\text{KJ}}{\text{s}} - 1100 \text{ kW}$$

$$\begin{aligned} 52030.92 \frac{\text{KJ}}{\text{s}} &= 2205.405 \frac{\text{KJ}}{\text{s}} + 1333.255 \frac{\text{KJ}}{\text{s}} (A/F) \\ (A/F) &= \frac{52030.92 \frac{\text{KJ}}{\text{s}} - 2205.405 \frac{\text{KJ}}{\text{s}}}{1333.255 \frac{\text{KJ}}{\text{s}}} \\ (A/F) &= 37.35 \end{aligned}$$

Harga dari *mechanical losses* didapatkan dari data *heat balance* turbin gas blok 3.2 dengan nilai 1100 kW (untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada lampiran)

Selanjutnya setelah kita mendapatkan nilai (A/F) dan  $\dot{m}_{bb}$ , kita akan masukan ke dalam rumus ;

$$\begin{aligned} \dot{m}_{udara} &= A/F \cdot \dot{m}_{bb} \\ &= 37.35 (4.99 \frac{\text{kg}}{\text{s}}) \\ &= 186.48 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \end{aligned}$$

Untuk  $\dot{m}_{udara}$  yang sudah ada, maka daya yang dibutuhkan kompresor dapat diperoleh

$$\begin{aligned} \dot{W}_{kompresor} &= \dot{m}_{udara} (h_2 - h_1) \\ \dot{W}_{kompresor} &= 186.48 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (696.81 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} - 301.59 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}) \\ \dot{W}_{kompresor} &= 73700.22 \frac{\text{KJ}}{\text{s}} \end{aligned}$$

### b) Perhitungan Daya yang Dibutuhkan Turbin

Untuk perhitungan daya yang dibutuhkan turbin pada GT 3.2 sebelum turbine inspection pada beban 50 MW, dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (6) ,

$$\dot{W}_{turbin} = (\dot{m}_{udara} + \dot{m}_{bahan \text{ bakar}}) \times (h_3 - h_4)$$



$$\dot{W}_{\text{turbin}} = (186.48 \frac{\text{kg}}{\text{s}} + 4.99 \frac{\text{kg}}{\text{s}}) \times (1635.22 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 972.82 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})$$

$$\dot{W}_{\text{turbin}} = 191.47 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1537.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{W}_{\text{turbin}} = 126831.15 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

### c) Daya Netto yang Dihasilkan Turbin

Daya netto adalah selisih antara yang dibutuhkan turbin dengan kerja kompresor yang digunakan untuk menentukan nilai efisiensi siklus.

$$\dot{W}_{\text{netto}} = \dot{W}_{\text{turbin}} - \dot{W}_{\text{kompresor}}$$

$$= 126831.15 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} - 73700.22 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$= 53130.93 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

### d) Specific Fuel Consumption (SFC)

Untuk menghitung besarnya konsumsi bahan bakar yang digunakan pada kondisi sebelum TI.GT 3.2 beban 50 MW, menggunakan persamaan (10)

$$\text{SFC} = \frac{\dot{m}_{\text{bb}}}{\dot{W}_{\text{netto}}}$$

$$\text{SFC} = \frac{\dot{m}_{\text{bb}}}{\dot{W}_{\text{netto}}}$$

$$= \frac{4.99 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}}{53130.93 \text{ kW}}$$

$$= 0.338 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$$

### e) Heat Rate Turbin

Untuk perhitungan heat rate pada beban 50 MW sebelum *turbine inspection*, menggunakan pers. (11)

$$\text{GT Heat Rate} = \frac{\dot{m}_{\text{bahan bakar}} \cdot \text{HHV}}{\text{Power Product}}$$

$$= \frac{4.99 \frac{kg}{s} \times 3600 \frac{s}{h} \times 46864.484 \frac{kJ}{kg} \times \frac{kcal}{4.18 kJ}}{50.47 \times 1000 kW}$$

$$= 3992.59 \frac{kcal}{kWh}$$

**f) Back Work Ratio (bwr)**

Back Work Ratio merupakan nilai persentase kerja spesifik turbin yang digunakan untuk menggerakkan kompresor.

$$bwr = \frac{\dot{W}_{kompresor}}{\dot{W}_{turbin}}$$

$$bwr = \frac{73700.22 \frac{kJ}{s}}{126831.15 \frac{kJ}{s}}$$

$$bwr = 0.58$$

**g) Efisiensi Turbin**

$$\eta_{turbin} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4s}} \times 100\%$$

$$= \frac{1257.31^\circ K - 748^\circ K}{1257.31^\circ K - 666.95^\circ K} \times 100\%$$

$$= 85.95\%$$

**h) Efisiensi Kompresor**

$$\eta_{kompresor} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} \times 100\%$$

$$= \frac{571.15^\circ K - 302.97^\circ K}{635.33^\circ K - 302.97^\circ K} \times 100\%$$

$$= 81.25\%$$

**i) Efisiensi Siklus (GT Efisiensi)**

Untuk perhitungan efisiensi siklus, kita dapat menggunakan pers. (13), dimana terlebih dahulu kita mencari panas yang masuk kedalam turbin ( $Q_{in}$ ) sebagai berikut ;

Pers. (4)

$$Q_{in} = LHV_{\text{bahan bakar}} \times \dot{m}_{\text{bahan bakar}}$$



Sementara untuk perhitungan  $Q_{in}$ , dibutuhkan nilai LHV terlebih dahulu melalui persamaan Dulong-Petit untuk mendapatkan nilai kalor LHV

$$LHV = HHV - 2400 (H_2O + 9H_2) \frac{KJ}{kg}$$

dimana ;

$H_2O$  = persentase kandungan uap air didalam bahan bakar

$H_2$  = persentase kandungan hydrogen didalam bahan bakar

Untuk data komposisi kandungan yang ada didalam bahan bakar (natural gas) dapat dilihat pada table dibawah ini

Tabel 4.4 Data komposisi natural gas

| No    | Komposisi Kandungan | Persentase (%) |
|-------|---------------------|----------------|
| 1     | $H_2$               | 1,82           |
| 2     | $CH_4$              | 93,33          |
| 3     | $C_2H_4$            | 0,25           |
| 4     | $CO_2$              | 0,22           |
| 5     | $N_2$               | 3,4            |
| 6     | $O_2$               | 0,35           |
| 7     | CO                  | 0,45           |
| 8     | $H_2S$              | 0,18           |
| Total |                     | 100            |

Data harga komposisi tersebut diambil pada sumber : *BBM-Niaga PLTG PJB UP, Gresik*

Dari data yang diketahui, maka didapatkan hasil untuk nilai kalor bawah,

$$LHV = HHV - 2400 (H_2O + 9H_2) \frac{KJ}{kg}$$

$$LHV = (46864.48 - 2400 (0.1899 + (9 \times 0.018))) \frac{KJ}{kg}$$

$$\text{LHV} = (46864.48 - 844.56) \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{LHV} = 46019.92 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

Selanjutnya setelah kita mendapatkan nilai LHV dan  $\dot{m}_{\text{bb}}$ , kita akan masukan ke dalam rumus ;

$$\dot{Q}_{\text{in}} = 46019.92 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} \times 4.99 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{Q}_{\text{in}} = 229754.409 \frac{\text{KJ}}{\text{s}}$$

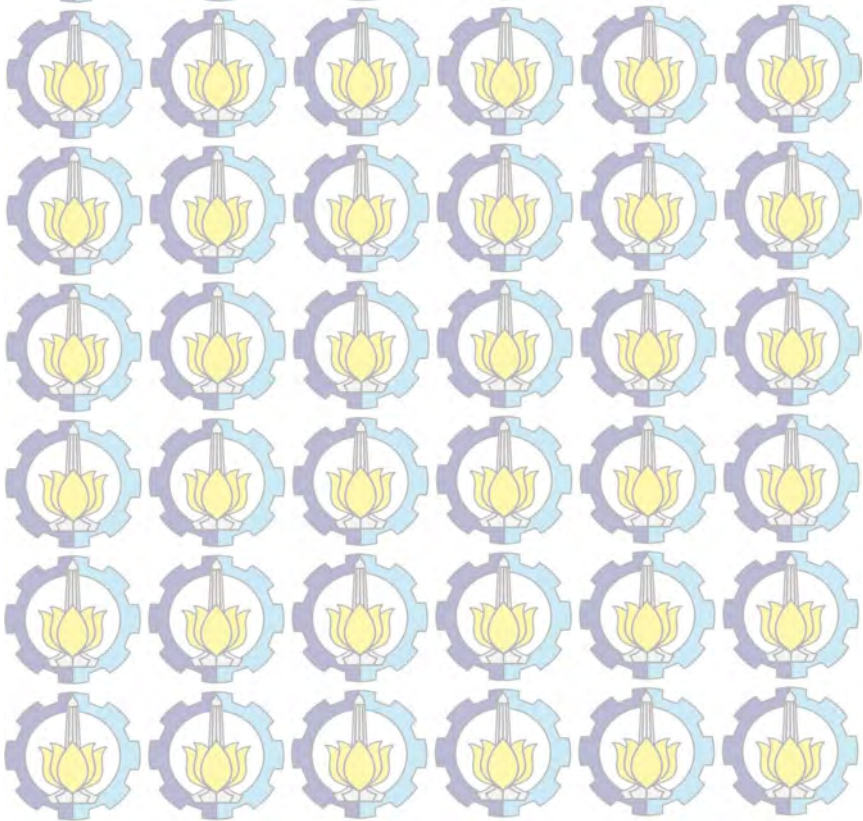
Dengan  $\dot{W}_{\text{netto}}$  dan  $\dot{Q}_{\text{in}}$  yang sudah diketahui, maka efisiensi siklus dapat diperoleh

$$\begin{aligned} \eta_{\text{siklus}} &= \frac{\dot{W}_{\text{netto}} \times 100 \%}{\dot{Q}_{\text{in}}} \\ &= \frac{53130.93 \frac{\text{KJ}}{\text{s}}}{229754.409 \frac{\text{KJ}}{\text{s}}} \times 100 \% \\ &= 23.13 \% \end{aligned}$$



### 4.2.3 Perhitungan Properties dan Performa Turbin Gas Sebelum dan Sesudah *Turbine Inspection* Dalam Bentuk Tabel

Data operasi sebelum dan sesudah *turbine inspection* yang dapat dilihat pada lampiran. Dengan mengacu pada data operasi maka jika kita menerapkan cara yang sama seperti sub bab 4.2.2.1 dan 4.2.2.2, hasil perhitungan performa untuk data operasi sebelum dan sesudah *turbine inspection* dengan variasi beban dapat disederhanakan dalam bentuk tabel performa untuk mempermudah pembacaan dan perbandingan performa. Tabel performa sebelum dan sesudah *turbine inspection* ditunjukkan pada tabel 4.5 dan 4.6



Tabel 4.5 Perbandingan Perfoma sebelum dan sesudah TI.GT 3.2

| PARAMETER                     | SATUAN             | NILAI PERFORMANCE   |           |          |
|-------------------------------|--------------------|---------------------|-----------|----------|
|                               |                    | PERFORMANCE SEBELUM | TI.GT 3.2 |          |
|                               |                    | 50 MW               | 75 MW     | 100 MW   |
| Power Product                 | kW                 | 50,500              | 75,300    | 94,630   |
| Power Factor                  | %                  | 0.97                | 0.99      | 0.99     |
| LHV Fuel Gas                  | kJ/kg              | 46019.92            | 46019.92  | 46019.92 |
| Compressor Inlet Temperature  | °C                 | 29.97               | 30.80     | 33.20    |
| Compressor Inlet Pressure     | kg/cm <sup>2</sup> | 1.02                | 1.03      | 1.03     |
| Compressor Outlet Temperature | °C                 | 362.33              | 382.33    | 414.33   |
| Compressor Outlet Pressure    | kg/cm <sup>2</sup> | 9.50                | 10.10     | 13.70    |
| Turbine Inlet Temperature     | °C                 | 1257.32             | 1335.84   | 1442.46  |
| Turbine Inlet Pressure        | kg/cm <sup>2</sup> | 9.10                | 9.70      | 13.10    |
| Turbine Outlet Temperature    | °C                 | 475                 | 511.00    | 515.33   |
| Turbine Outlet Pressure       | kg/cm <sup>2</sup> | 1.04                | 1.04      | 1.04     |
| in fuel                       | kg/s               | 4.99                | 6.26      | 7.43     |
| in air                        | kg/s               | 182.48              | 221.93    | 195.97   |
| Air Fuel Ratio                | %                  | 36.55               | 35.47     | 26.39    |
| W netto                       | kJ/s               | 52061.86            | 76060.61  | 95585.86 |
| Compressor Efficiency         | %                  | 81.25               | 79.73     | 88.13    |
| Turbine Efficiency            | %                  | 85.95               | 86.09     | 86.69    |
| Generator Efficiency          | %                  | 96.04               | 98.61     | 99.39    |
| Heat Rate                     | kcal/kWh           | 3984.00             | 3348.87   | 3161.98  |
| GT Efficiency                 | %                  | 22.66               | 26.41     | 27.97    |



Tabel 4.5 (Lanjutan)

| NILAI PERFORMANCE               |          |          |  |
|---------------------------------|----------|----------|--|
| PERFORMANCE SESUDAH T.I.G.T 3.2 |          |          |  |
| 50 MW                           | 75 MW    | 100 MW   |  |
| 49970                           | 75270    | 95730    |  |
| 0.98                            | 0.95     | 0.96     |  |
| 44697.70                        | 44694.20 | 44694.20 |  |
| 26.97                           | 28.20    | 29.60    |  |
| 1.02                            | 1.03     | 1.03     |  |
| 352.67                          | 369.33   | 397.67   |  |
| 9.50                            | 10.10    | 13.70    |  |
| 1205.76                         | 1312.23  | 1383.61  |  |
| 9.10                            | 9.70     | 13.10    |  |
| 444.33                          | 498.67   | 483.67   |  |
| 1.04                            | 1.05     | 1.05     |  |
| 4.88                            | 6.25     | 7.37     |  |
| 199.52                          | 243.12   | 223.03   |  |
| 40.86                           | 38.90    | 30.27    |  |
| 50989.80                        | 79231.58 | 99718.75 |  |
| 82.09                           | 81.46    | 90.18    |  |
| 85.95                           | 85.84    | 86.62    |  |
| 98.06                           | 94.66    | 95.27    |  |
| 3826.45                         | 3251.53  | 3013.71  |  |
| 23.36                           | 28.36    | 30.28    |  |

Tabel 4.6 Perbandingan Perfoma sebelum dan sesudah TI.GT 3.3

| PARAMETER                     | SATUAN             | NILAI PERFORMANCE             |           |           |
|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|-----------|-----------|
|                               |                    | PERFORMANCE SEBELUM TI.GT 3.3 |           |           |
|                               |                    | 50 MW                         | 100 MW    | Maks.     |
| Power Product                 | kW                 | 89600                         | 99970     | 104300    |
| Power Factor                  | %                  | 0.96                          | 1.00      | 0.99      |
| LHV Fuel Gas                  | kJ/kg              | 46494.65                      | 46494.65  | 46494.65  |
| Compressor Inlet Temperature  | °C                 | 28.87                         | 30.60     | 29.90     |
| Compressor Inlet Pressure     | kg/cm <sup>2</sup> | 1.02                          | 1.03      | 1.03      |
| Compressor Outlet Temperature | °C                 | 403.00                        | 412.33    | 412.67    |
| Compressor Outlet Pressure    | kg/cm <sup>2</sup> | 9.50                          | 10.10     | 13.70     |
| Turbine Inlet Temperature     | °C                 | 1276.93                       | 1346.24   | 1464.07   |
| Turbine Inlet Pressure        | kg/cm <sup>2</sup> | 9.1                           | 9.70      | 13.10     |
| Turbine Outlet Temperatur     | °C                 | 486.67                        | 518.67    | 527.67    |
| Turbine Outlet Pressure       | kg/cm <sup>2</sup> | 1.043                         | 1.05      | 1.046     |
| in fuel                       | kg/s               | 7.08                          | 7.72      | 7.98      |
| in air                        | kg/s               | 323.13                        | 292.92    | 212.94    |
| Air Fuel Ratio                | %                  | 45.67                         | 37.96     | 26.68     |
| W netto                       | kJ/s               | 9443.33                       | 101070.00 | 106453.54 |
| Compressor Effisiensi         | %                  | 71.92                         | 73.38     | 86.81     |
| Turbine Effisiensi            | %                  | 85.95                         | 85.84     | 86.62     |
| Q input                       | kJ/s               | 328949.62                     | 358822.43 | 371143.51 |
| Heat Rate                     | kcal/kWh           | 3219.33                       | 3147.42   | 3120.34   |
| GT Effisiensi                 | %                  | 28.71                         | 28.17     | 28.68     |



Tabel 4.6 (Lanjutan)

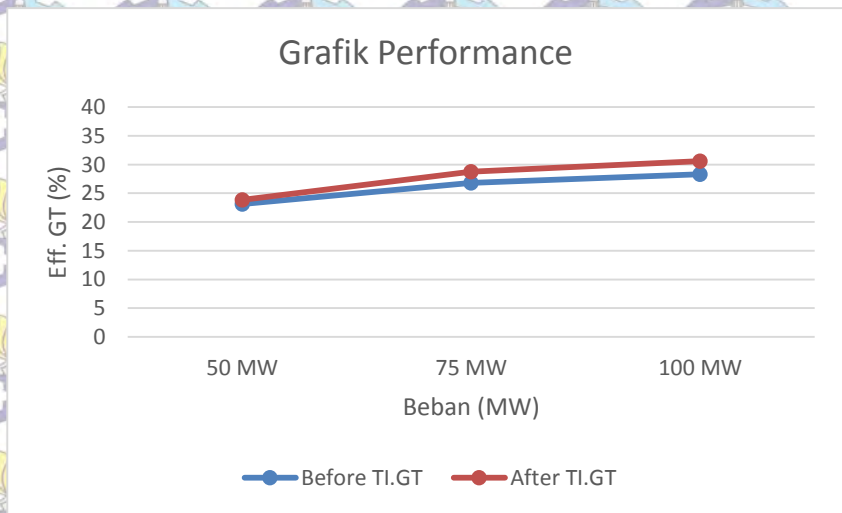
| NILAI PERFORMANCE             |           |           |  |
|-------------------------------|-----------|-----------|--|
| PERFORMANCE SESUDAH TI.GT 3.3 |           |           |  |
| 50 MW                         | 100 MW    | Mats.     |  |
| 89900                         | 99970     | 114300    |  |
| 0.96                          | 0.96      | 0.97      |  |
| 45856.29                      | 45856.29  | 45856.29  |  |
| 25.17                         | 25.10     | 27.33     |  |
| 1.02                          | 1.03      | 1.03      |  |
| 384.00                        | 391.00    | 403.00    |  |
| 9.50                          | 10.10     | 13.70     |  |
| 1252.83                       | 1292.39   | 1450.65   |  |
| 9.10                          | 9.70      | 13.10     |  |
| 472.33                        | 487.00    | 520.33    |  |
| 1.04                          | 1.05      | 1.046     |  |
| 6.88                          | 7.46      | 8.33      |  |
| 340.64                        | 336.73    | 243.26    |  |
| 49.55                         | 45.15     | 29.22     |  |
| 94745.83                      | 105235.42 | 118935.05 |  |
| 74.07                         | 75.16     | 87.70     |  |
| 85.95                         | 85.84     | 86.62     |  |
| 315261.97                     | 341973.26 | 381753.59 |  |
| 3075.84                       | 3000.37   | 2929.47   |  |
| 30.05                         | 30.77     | 31.15     |  |

### 4.3 Perbandingan Performa Turbin Gas Sebelum dan Sesudah *Turbine Inspection*

Perhitungan performa turbin gas pada GT 3.2 dan GT 3.3 sebelum dan sesudah *turbine inspection* dapat kita lihat pada tabel 4.5 dan 4.6 pada sub bab sebelumnya. Di dalam sub bab tersebut dapat kita lihat perbedaan efisiensi, heat rate, serta AFR antara sebelum dan sesudah *turbine inspection* dengan beban *gas turbine* yang sama. Jika perbedaan tersebut kita sajikan dalam bentuk grafik hasilnya akan menjadi sebagai berikut :

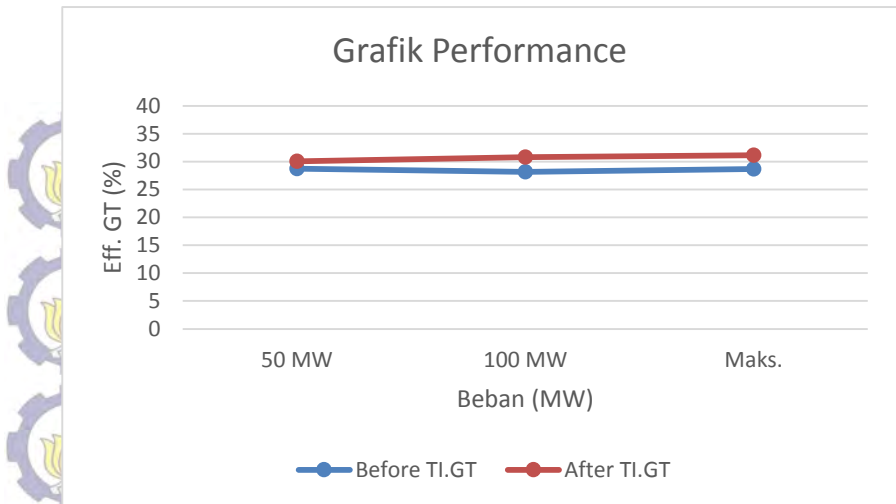
#### 4.3.1 Perbandingan Efisiensi Sebelum dan Sesudah *Turbine Inspection*

Untuk mempermudah pembacaan kita bisa melihat perbedaan dari grafik dibawah :



Gambar 4.3 Grafik Perbandingan Efisiensi Sebelum dan Sesudah *Turbine Inspection* pada GT 3.2



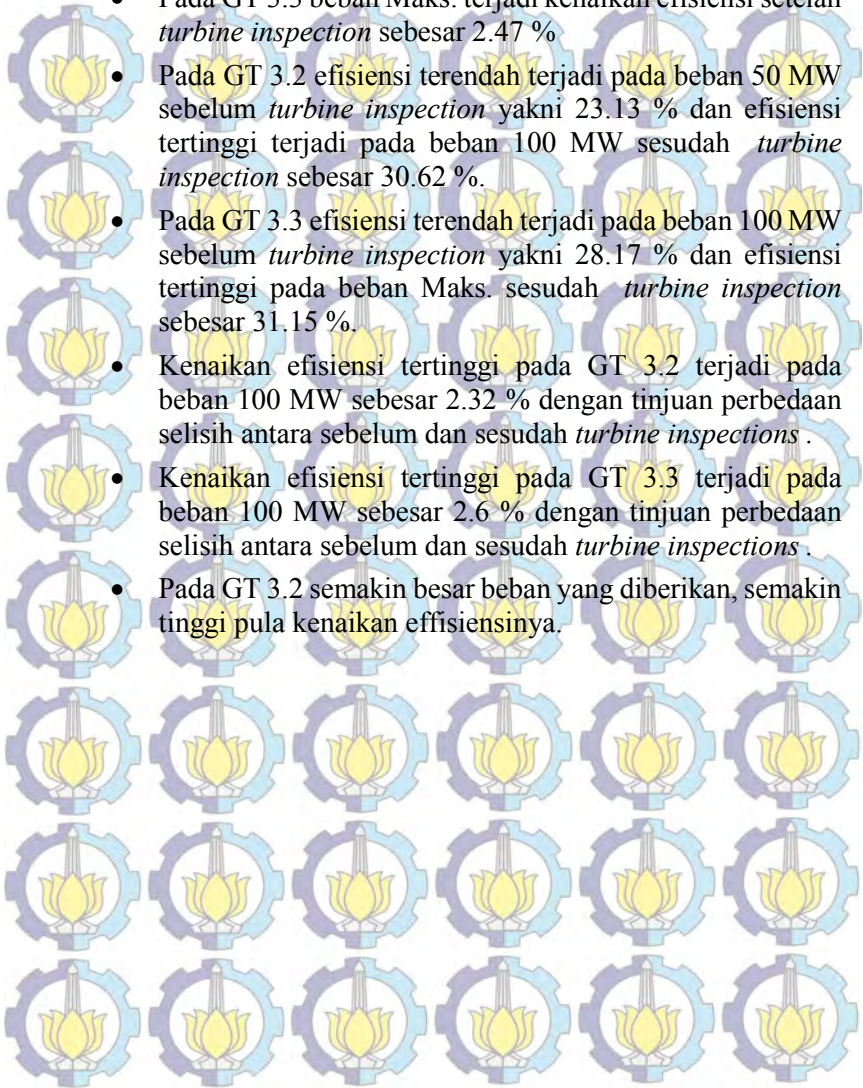


Gambar 4.4 Grafik Perbandingan Efisiensi Sebelum dan Sesudah *Turbine Inspection* pada GT 3.3

Hasil grafik perbandingan Efisiensi Sebelum dan Sesudah *turbine inspection* pada GT 3.2 dan GT 3.3 menunjukkan bahwa :

- Efisiensi sesudah *turbine inspection* menunjukkan kenaikan daripada efisiensi sebelum *turbine inspection*. Kenaikan efisiensi pada GT 3.2 ,rata-rata menunjukan kenaikan sebesar 1.68 % dan pada GT 3.3, rata-rata menunjukan kenaikan sebesar 2.13 %
- Pada GT 3.2 beban 50 MW terjadi kenaikan efisiensi setelah *turbine inspection* sebesar 0.74 %
- Pada GT 3.2 beban 75 MW terjadi kenaikan efisiensi setelah *turbine inspection* sebesar 1.97 %
- Pada GT 3.2 beban 100 MW terjadi kenaikan efisiensi setelah *turbine inspection* sebesar 2.32 %
- Pada GT 3.3 beban 50 MW terjadi kenaikan efisiensi setelah *turbine inspection* sebesar 1.88 %

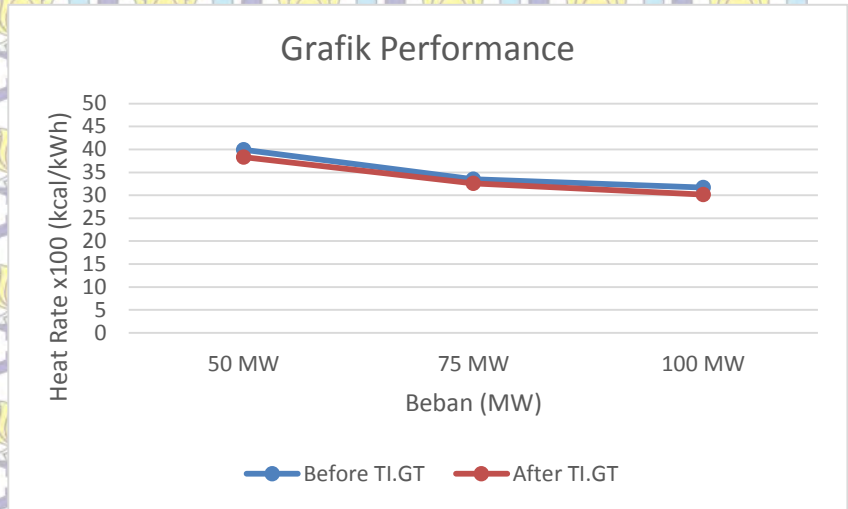
- Pada GT 3.3 beban 100 MW terjadi kenaikan efisiensi setelah *turbine inspection* sebesar 2.6 %
- Pada GT 3.3 beban Maks. terjadi kenaikan efisiensi setelah *turbine inspection* sebesar 2.47 %
- Pada GT 3.2 efisiensi terendah terjadi pada beban 50 MW sebelum *turbine inspection* yakni 23.13 % dan efisiensi tertinggi terjadi pada beban 100 MW sesudah *turbine inspection* sebesar 30.62 %.
- Pada GT 3.3 efisiensi terendah terjadi pada beban 100 MW sebelum *turbine inspection* yakni 28.17 % dan efisiensi tertinggi pada beban Maks. sesudah *turbine inspection* sebesar 31.15 %.
- Kenaikan efisiensi tertinggi pada GT 3.2 terjadi pada beban 100 MW sebesar 2.32 % dengan tinjauan perbedaan selisih antara sebelum dan sesudah *turbine inspections* .
- Kenaikan efisiensi tertinggi pada GT 3.3 terjadi pada beban 100 MW sebesar 2.6 % dengan tinjauan perbedaan selisih antara sebelum dan sesudah *turbine inspections* .
- Pada GT 3.2 semakin besar beban yang diberikan, semakin tinggi pula kenaikan effisiensinya.



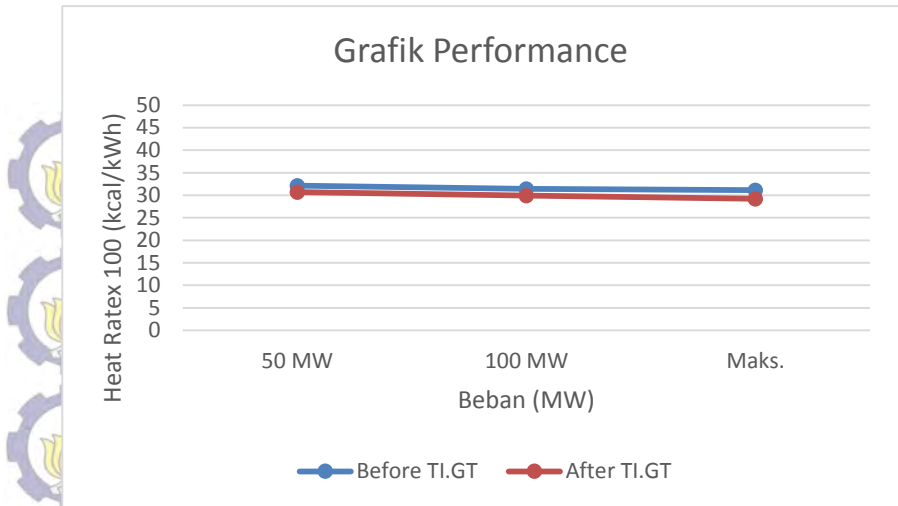


### 4.3.2 Perbandingan Heat Rate Sebelum dan Sesudah *Turbine Inspection*

Untuk mempermudah pembacaan kita bisa melihat perbedaan dari grafik dibawah :



Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Heat Rate Sebelum dan Sesudah *Turbine Inspection* pada GT 3.2



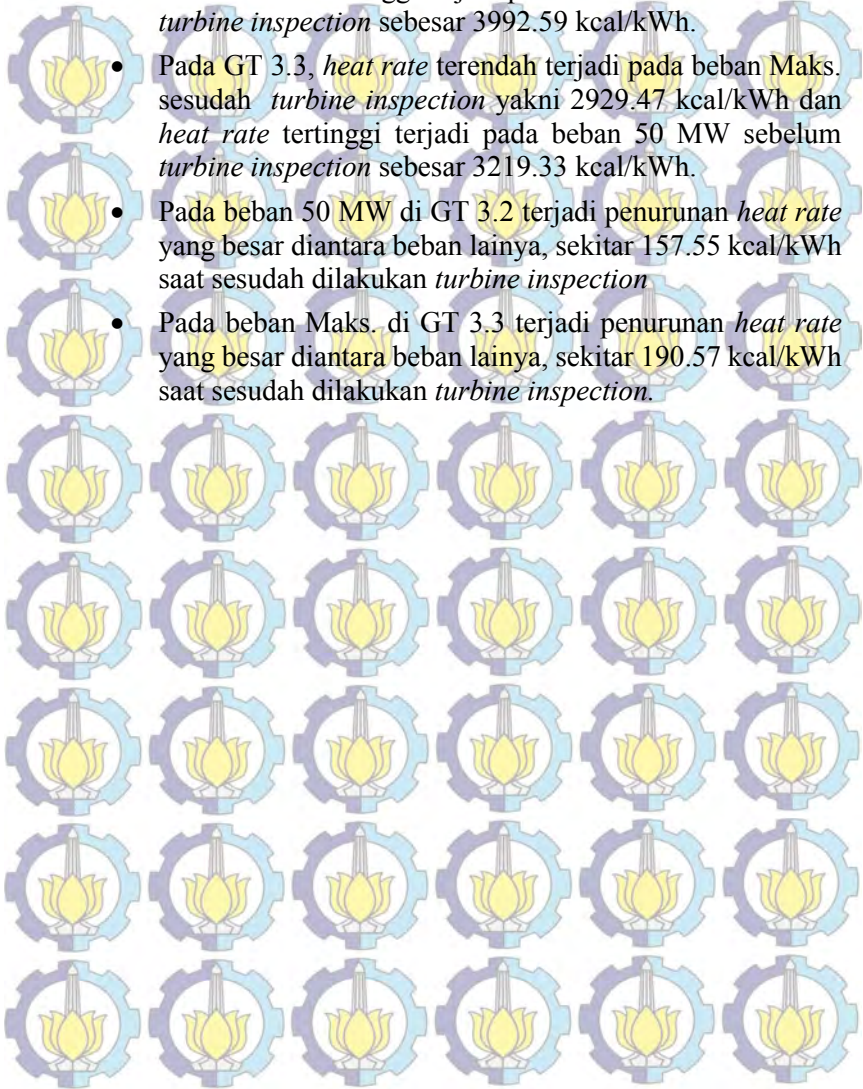
Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Heat Rate Sebelum dan Sesudah *Turbine Inspection* pada GT 3.3

Hasil grafik perbandingan Heat Rate Sebelum dan Sesudah *turbine inspection* pada GT 3.2 dan GT 3.3 menunjukkan bahwa :

- Heat rate sesudah *turbine inspection* menunjukkan penurunan daripada heat rate sebelum *turbine inspection*.
- Pada GT 3.2 beban 50 MW terjadi penurunan *heat rate* setelah *turbine inspection* sebesar 160.16 kcal/kWh
- Pada GT 3.2 beban 75 MW terjadi penurunan *heat rate* setelah *turbine inspection* sebesar 97.49 kcal/kWh
- Pada GT 3.2 beban 100 MW terjadi penurunan *heat rate* setelah *turbine inspection* sebesar 148.5 kcal/kWh
- Pada GT 3.3 beban 50 MW terjadi penurunan *heat rate* setelah *turbine inspection* sebesar 143.48 kcal/kWh
- Pada GT 3.3 beban 100 MW terjadi penurunan *heat rate* setelah *turbine inspection* sebesar 147.05 kcal/kWh
- Pada GT 3.3 beban 100 Maks. terjadi penurunan *heat rate* setelah *turbine inspection* sebesar 190.87 kcal/kWh

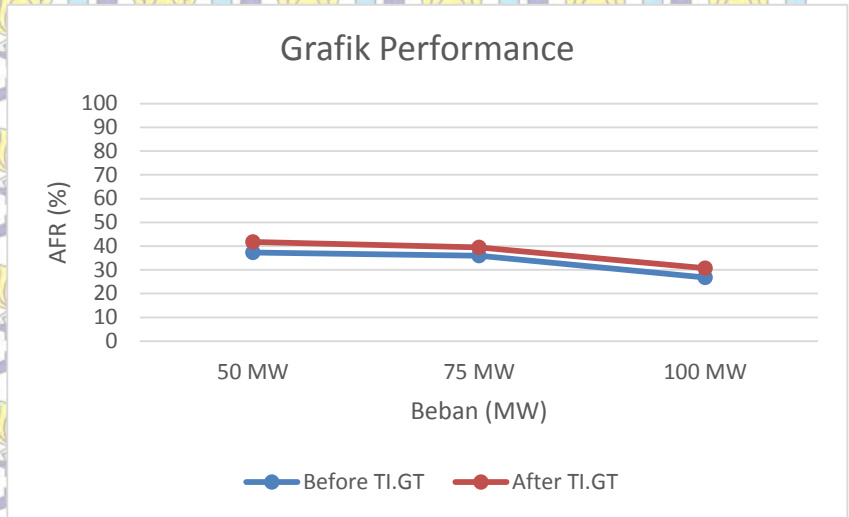


- Pada GT 3.2, *heat rate* terendah terjadi pada beban 100 MW sesudah *turbine inspection* yakni 3018.42 kcal/kWh dan *heat rate* tertinggi terjadi pada beban 50 MW sebelum *turbine inspection* sebesar 3992.59 kcal/kWh.
- Pada GT 3.3, *heat rate* terendah terjadi pada beban Maks. sesudah *turbine inspection* yakni 2929.47 kcal/kWh dan *heat rate* tertinggi terjadi pada beban 50 MW sebelum *turbine inspection* sebesar 3219.33 kcal/kWh.
- Pada beban 50 MW di GT 3.2 terjadi penurunan *heat rate* yang besar diantara beban lainnya, sekitar 157.55 kcal/kWh saat sesudah dilakukan *turbine inspection*.
- Pada beban Maks. di GT 3.3 terjadi penurunan *heat rate* yang besar diantara beban lainnya, sekitar 190.57 kcal/kWh saat sesudah dilakukan *turbine inspection*.



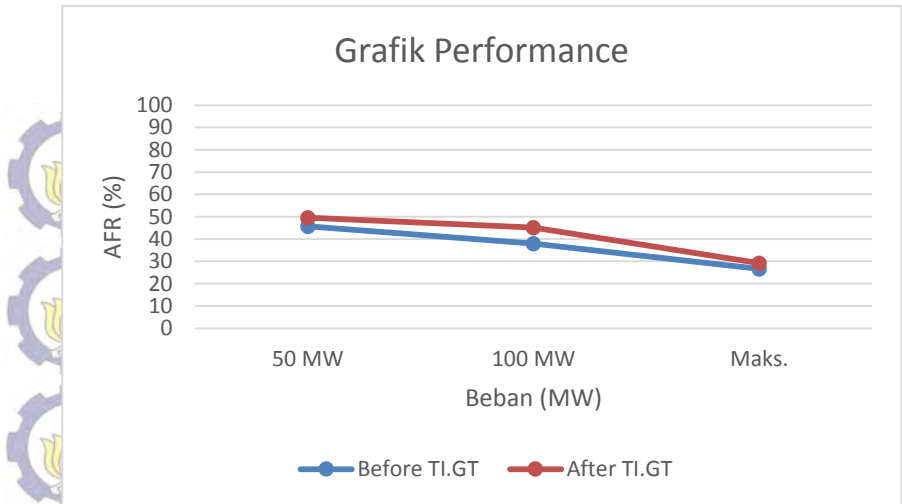
### 4.3.3 Perbandingan Air Fuel Ratio Sebelum dan Sesudah *Turbine Inspection*

Untuk mempermudah pembacaan kita bisa melihat perbedaan dari grafik dibawah :



Gambar 4.7 Grafik Perbandingan AFR Sebelum dan Sesudah *Turbine Inspection* pada GT 3.2



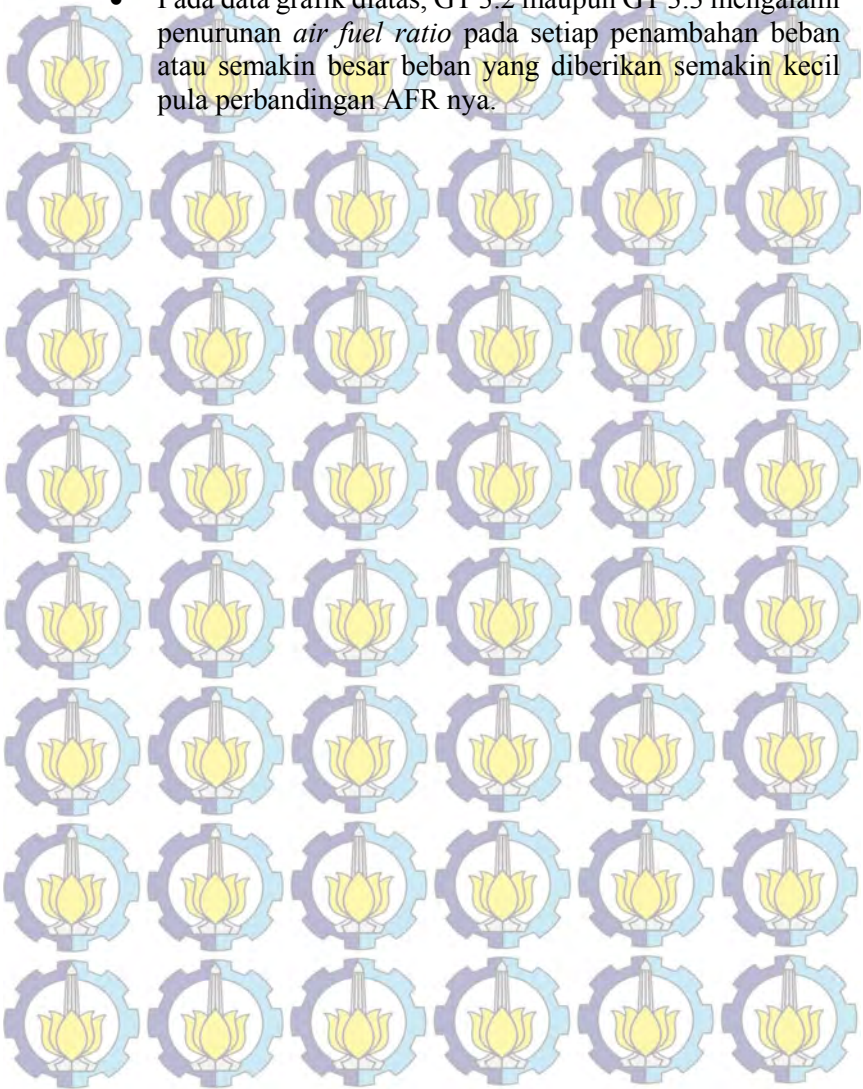


Gambar 4.8 Grafik Perbandingan AFR Sebelum dan Sesudah *Turbine Inspection* pada GT 3.3

Hasil grafik perbandingan Air Fuel Ratio Sebelum dan Sesudah *turbine inspection* pada GT 3.2 dan GT 3.3 menunjukkan bahwa :

- *Air Fuel Ratio* sesudah *turbine inspection* menunjukkan kenaikan daripada *air fuel ratio* sebelum *turbine inspection*.
- Pada GT 3.2 beban 50 MW terjadi kenaikan *air fuel ratio* setelah *turbine inspection* sebesar 4.45 %
- Pada GT 3.2 beban 75 MW terjadi kenaikan *air fuel ratio* setelah *turbine inspection* sebesar 3.46 %
- Pada GT 3.2 beban 100 MW terjadi kenaikan *air fuel ratio* setelah *turbine inspection* sebesar 3.91 %
- Pada GT 3.3 beban 50 MW terjadi kenaikan *air fuel ratio* setelah *turbine inspection* sebesar 3.88 %
- Pada GT 3.3 beban 100 MW terjadi kenaikan *air fuel ratio* setelah *turbine inspection* sebesar 7.19 %

- Pada GT 3.3 beban Maks. terjadi kenaikan *air fuel ratio* setelah *turbine inspection* sebesar 2.54 %
- Pada data grafik diatas, GT 3.2 maupun GT 3.3 mengalami penurunan *air fuel ratio* pada setiap penambahan beban atau semakin besar beban yang diberikan semakin kecil pula perbandingan AFR nya.





#### 4.3.4 Perbandingan Specific Fuel Consumption Sebelum dan Sesudah *Turbine Inspection*

Dengan mengacu pada data operasi maka jika kita menerapkan cara yang sama seperti sub bab 4.2.2.2, hasil perhitungan *specific fuel consumption* untuk data operasi sebelum dan sesudah *turbine inspection* dengan variasi beban dapat disederhanakan dalam bentuk tabel 4.7 dan 4.8 untuk mempermudah pembacaan dan perbandingan.

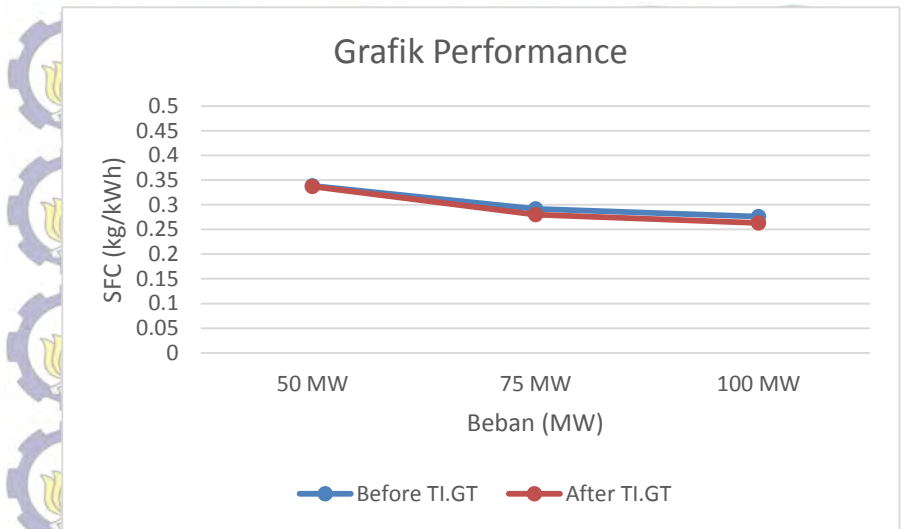
Tabel 4.7 Perbandingan SFC GT. 3.2 sebelum dan sesudah *turbine inspection*

| Beban | Sebelum | Sesudah |
|-------|---------|---------|
| 50    | 0,338   | 0,337   |
| 75    | 0,292   | 0,280   |
| 100   | 0,276   | 0,263   |
| MW    | Kg/kWh  | Kg/kWh  |

Tabel 4.8 Perbandingan SFC GT. 3.3 sebelum dan sesudah *turbine inspection*

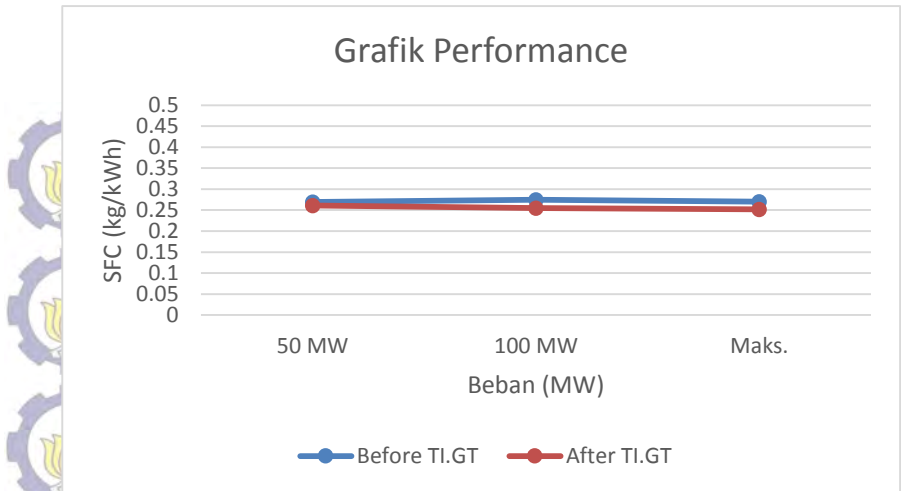
| Beban | Sebelum | Sesudah |
|-------|---------|---------|
| 50    | 0,270   | 0,261   |
| 100   | 0,275   | 0,255   |
| Maks. | 0,270   | 0,252   |
| MW    | Kg/kWh  | Kg/kWh  |

Untuk mempermudah pembacaan kita bisa melihat perbedaan dari grafik dibawah :



Gambar 4.9 Grafik Perbandingan SFC Sebelum dan Sesudah *Turbine Inspection* pada GT 3.2



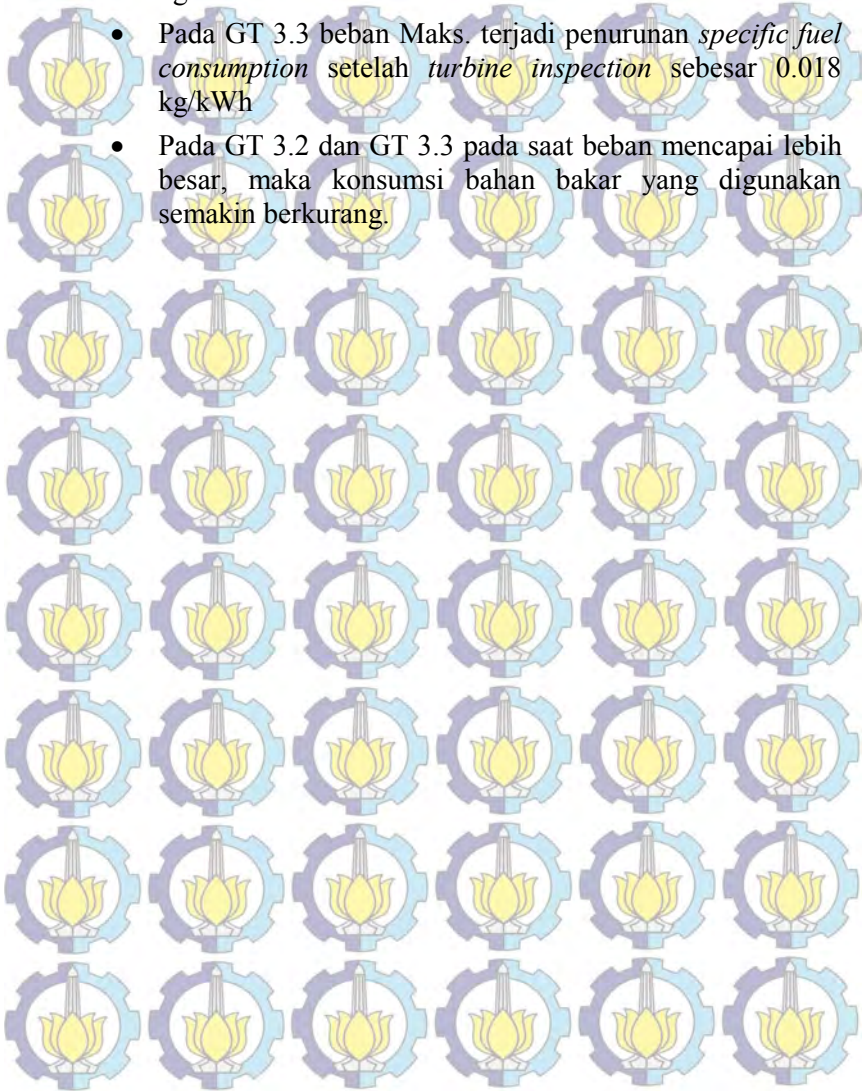


Gambar 4.10 Grafik Perbandingan SFC Sebelum dan Sesudah *Turbine Inspection* pada GT 3.3







Hasil grafik perbandingan Specific Fuel Consumption Sebelum dan Sesudah *turbine inspection* pada GT 3.2 dan GT 3.3 menunjukkan bahwa :

- *Specific fuel consumption* sesudah *turbine inspection* menunjukkan penurunan daripada *specific fuel consumption* sebelum *turbine inspection*.
- Pada GT 3.2 beban 50 MW terjadi penurunan *specific fuel consumption* setelah *turbine inspection* sebesar 0.001 kg/kWh
- Pada GT 3.2 beban 75 MW terjadi penurunan *specific fuel consumption* setelah *turbine inspection* sebesar 0.012 kg/kWh
- Pada GT 3.2 beban 100 MW terjadi penurunan *specific fuel consumption* setelah *turbine inspection* sebesar 0.013 kg/kWh
- Pada GT 3.3 beban 50 MW terjadi penurunan *specific fuel consumption* setelah *turbine inspection* sebesar 0.009 kg/kWh





- Pada GT 3.3 beban 100 MW terjadi penurunan *specific fuel consumption* setelah *turbine inspection* sebesar 0.020 kg/kWh
- Pada GT 3.3 beban Maks. terjadi penurunan *specific fuel consumption* setelah *turbine inspection* sebesar 0.018 kg/kWh
- Pada GT 3.2 dan GT 3.3 pada saat beban mencapai lebih besar, maka konsumsi bahan bakar yang digunakan semakin berkurang.

















#### 4.4 Tahapan Pengerjaan pada OH Turbine Inspection

| No. | Hasil Inspeksi   | Sebelum Foto  | Tindakan   | Sesudah Foto   |
|-----|--|---|--|--|
|     |  |   |  |  |
| 1   | <ul style="list-style-type: none"> <li>PT Check semua part hasil normal</li> </ul>                         |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Penggantian O-ring, bearing dan oil seal baru.</li> </ul>                 |    |
| 2   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Filter JOP kotor</li> </ul>   |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Dilakukan cleaning filter JOP</li> <li>Regreasing coupling JOP</li> </ul> |    |
| 3   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Kondisi normal</li> <li>Indikasi check valve ACO P bocor</li> </ul> |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Dilakukan cleaning dan penggantian O-ring baru (ACO P)</li> </ul>         |  |


















| No. | Sebelum   |  | Sesudah   |   |
|-----|---|--|---|---|
|     | Hasil Inspeksi  | Foto   | Tindakan  | Foto  |
|     |   |   | <ul style="list-style-type: none"><li>• Change over check valve MCO P ke ACO P</li><li>• Penggantian check valve ACO P ex return</li><li>• Cleaning dan penggantian O-ring baru</li></ul> |   |
| 4   | <ul style="list-style-type: none"><li>• Terjadi kebocoran oli antara shell dan spacer plate</li></ul> |  | <ul style="list-style-type: none"><li>• Dilakukan cleaning tube</li><li>• Dilakukan penggantian packing, dan O-ring</li></ul>   |  |

| No. | Sebelum   |   | Sesudah  |   |
|-----|---|---|--|---|
|     | Hasil Inspeksi  | Foto  | Tindakan   | Foto  |
| 5   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ditemukan banyak gram didalam tangki</li> </ul>              |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Dilakukan cleaning tangki dan strainer ACO P dan MCO P</li> </ul> |   |
| 6   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Kondisi bearing lifeti me</li> <li>Oil seal bocor</li> </ul> |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Penggantian bearing dan oil seal</li> </ul>                       |  |
| 7   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ditemukan banyak welding di beber apa titik.</li> </ul>      |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Penggantian pipa, elbow dan union coupling baru.</li> </ul>       |  |

| No. | Sebelum  |   | Sesudah  |   |
|-----|--|---|--|---|
|     | Hasil Inspeksi   | Foto  | Tindakan   | Foto  |
| 8   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Program reliability</li> </ul>                            |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Penggantian OST 1 Set baru</li> </ul>   |   |
| 9   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Kotor</li> </ul>  |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Cleaning dan regreasing</li> </ul>  |   |
| 10  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Program Roll In Roll Out</li> <li>Program LTSA</li> </ul> | <br> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Roll in Roll out ( Part EX Repair )</li> <li>Cross Flame tube, Sleeve, Plug ganti baru</li> <li>Marm an Coupli</li> </ul> | <br> |












| No. | Sebelum  |   | Sesudah  |  |
|-----|--|---|--|--|
|     | Hasil Inspeksi   | Foto  | Tindakan   | Foto   |
|     |  |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>ng ganti baru</li> <li>• Progra m LTSA</li> </ul>   |  |
| 11  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Progra m Roll In Roll Out</li> <li>• Progra m LTSA</li> </ul> |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transi tien Piece Ganti ex Repair</li> <li>• Pengg antian Seal transiti on piece baru</li> <li>• Progra m LTSA</li> </ul> |   |
| 12  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Progra m reliabi lity</li> </ul>                              |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Blade ring row #2, #3 dan #4 ganti baru 1 set (termasuk</li> </ul>  |    |







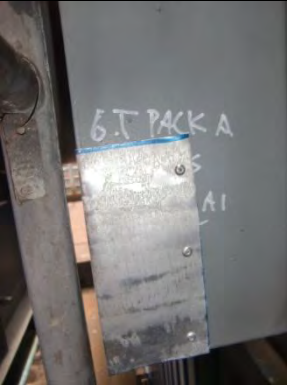
| No. | Sebelum  |  | Sesudah  |   |
|-----|--|--|--|---|
|     | Hasil Inspeksi   | Foto   | Tindakan   | Foto  |
|     |  |   | ring segment)  |   |
| 13  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Program Roll In Roll Out</li> <li>LTSA PJB - MHI</li> </ul>         | <br> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Vane Segment # 1 Ganti part ex return</li> <li>Vane Segment # 2 Ganti Baru</li> <li>Centering Seal Housing # 2</li> </ul> | <br>    |
| 14  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Program Roll In Roll Out</li> <li>Program LTSA PJB - MHI</li> </ul> |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Vane Segment # 3 Ganti baru</li> <li>Vane Segment # 4 Reuse</li> <li>Seal Housing #3 dan #4</li> </ul>                    | <br> |

| No. | Sebelum  |   | Sesudah  |   |
|-----|--|---|--|---|
|     | Hasil Inspeksi   | Foto  | Tindakan   | Foto  |
|     |  |    | Ganti baru 1 set   |   |
| 15  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Program Roll In Roll Out</li> <li>Program LTSA</li> </ul> |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Penggantian Seal Housing # 1, 2, 3 dan 4 baru</li> </ul>              |   |
| 16  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Program Roll in Roll Out</li> <li>Program LTSA</li> </ul> |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ganti Blade Row # 1 baru</li> <li>Ganti Blade Row # 2 baru</li> </ul> |    |











| No. | Sebelum  |   | Sesudah  |  |
|-----|--|---|--|--|
|     | Hasil Inspeksi   | Foto  | Tindakan   | Foto   |
| 17  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Program Roll in – Roll Out (Program LTSA)</li> </ul>              |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ganti Blade Row # 3 baru</li> <li>Ganti Blade Row # 4 baru</li> </ul>   |    |
| 18  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Program Roll in – Roll Out</li> <li>Program LTSA Kotor</li> </ul> |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Penggantian part ex return</li> <li>Pressure Test</li> <li>Spray Test</li> <li>Cleaning</li> <li>Check Clearance</li> </ul> |   |
| 19  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ditemukan Crack</li> </ul>  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Welding Repair pada bagian yang Crack</li> </ul>  |  |





| No. | Sebelum   |  | Sesudah  |  |
|-----|---|--|--|--|
|     | Hasil Inspeksi  | Foto   | Tindakan   | Foto   |
| 20  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Casin g Crack Pada beber apa titik</li> <li>Isolasi Casin g Rusak</li> </ul> |      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Repair Welding</li> <li>Perbaikan Isolasi baru</li> </ul> |      |
| 21  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Crack pada beber apa tempat</li> </ul>                                       |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Repair Welding pada bagian yang Crack</li> </ul>          |   |

| No. | Sebelum  |   | Sesudah   |  |
|-----|--|---|---|--|
|     | Hasil Inspeksi   | Foto  | Tindakan  | Foto   |
| 22  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Normal tidak ada kebocoran</li> </ul> |     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ganti SWG dan Packing</li> </ul> |   |
| 23  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Box bocor</li> </ul>                  |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Repair</li> </ul>                |   |












| No. | Sebelum  |  | Sesudah  |   |
|-----|--|--|--|---|
|     | Hasil Inspeksi   | Foto   | Tindakan   | Foto  |
| 24  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Hasil leak test ditemukan kebocoran 1 titik (tube on header)</li> <li>Plate dead zone lepas 3 ea</li> </ul> |      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Welding repair sesuai WPS</li> <li>Welding repair support plat dead zone dan penggantian bolt &amp; nut baru</li> </ul> |   |
| 25  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Seal Blade Rusak 18 pasang</li> </ul>   |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Penggantian Seal Blade baru</li> <li>Penggantian Holder baru</li> </ul>   |    |





| No. | Sebelum  |  | Sesudah  |  |
|-----|--|--|--|--|
|     | Hasil Inspeksi   | Foto   | Tindakan   | Foto   |
| 26  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Kondisi flange s aus/sc ratch</li> </ul>  |      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Dilakukan machining pada flange s, pengelasan dan penggantian SWG baru</li> </ul> |      |
| 27  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Expansion Joint Header SH 2 &amp; SH 1 Inlet &amp; Outlet Rusak 4 ea</li> </ul> |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Penggantian Expansion Joint Header baru 4 ea</li> </ul>                           |   |

| No. | Sebelum   |  | Sesudah  |   |
|-----|---|--|--|---|
|     | Hasil Inspeksi  | Foto   | Tindakan   | Foto  |
| 28  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Kotor</li> </ul>   |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Cleaning</li> <li>Pengecekan Demister</li> <li>Penggantian SWG Manhole Baru</li> </ul>              |   |
| 29  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Disc dan Seat Scratch</li> <li>Kondisi stem nut rusak</li> </ul> |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Lapping Disc dan Seat</li> <li>Penggantian graphite press ring</li> <li>Contact Check OK</li> </ul> |  |







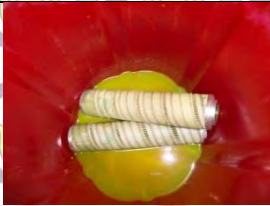



| No. | Sebelum   |   | Sesudah  |  |
|-----|---|---|--|--|
|     | Hasil Inspeksi  | Foto  | Tindakan   | Foto   |
| 30  | <ul style="list-style-type: none"><li>• Disc dan Seat bocor (scratch)</li></ul> |    | <ul style="list-style-type: none"><li>• Lapping Disc dan Seat</li><li>• Contact Check Ok</li></ul> |   |
| 31  | <ul style="list-style-type: none"><li>• Disc dan Seat Scratch</li></ul>         |  | <ul style="list-style-type: none"><li>• Lapping Disc dan Seat</li><li>• Contact Check OK</li></ul> |  |


| No. | Sebelum   |   | Sesudah   |   |
|-----|---|---|---|---|
|     | Hasil Inspeksi  | Foto  | Tindakan  | Foto  |
| 32  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Disc dan Seat bocor (Scratch)</li> </ul> |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Lapping Disc dan Seat</li> <li>Contact Check Ok</li> </ul> |    |
| 33  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Disc dan Seat Scratch</li> </ul>         |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Lapping Disc dan Seat</li> <li>Contact Check OK</li> </ul> | <br> |

| No. | Sebelum  |  | Sesudah  |   |
|-----|--|--|--|---|
|     | Hasil Inspeksi   | Foto   | Tindakan   | Foto  |
| 34  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Disc dan Seat bocor (Scratch)</li> </ul>                    |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Lapping Disc dan Seat</li> <li>Contact Check Ok</li> </ul>  |   |
| 35  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Casing seat crack</li> <li>Seat dan disc scratch</li> </ul> |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Penggantian casing seat ex return</li> <li>Lapping Disc dan Seat</li> <li>Contact Check OK</li> </ul> |  |






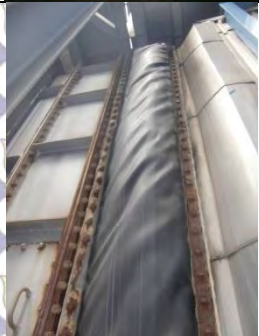


| No. | Sebelum   |  | Sesudah  |  |
|-----|---|--|--|--|
|     | Hasil Inspeksi  | Foto   | Tindakan   | Foto   |
| 36  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Disc dan Seat Scratch</li> </ul> |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Penggantian pilot valve baru</li> <li>Contact Check OK</li> </ul> |   |
| 37  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Disc dan Seat Scratch</li> </ul> |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Lapping Disc dan Seat</li> <li>Contact Check OK</li> </ul>        |   |
| 38  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Disc dan Seat Scratch</li> </ul> |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Lapping Disc dan Seat</li> <li>Contact Check OK</li> </ul>        |    |

| No. | Sebelum   |   | Sesudah  |  |
|-----|---|---|--|--|
|     | Hasil Inspeksi  | Foto  | Tindakan   | Foto   |
|     |   |    |  |    |
| 39  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Kondisi bladder A bocor 1 ea</li> <li>Kondisi filter supply dan return kotor</li> <li>Kondisi flexible hose (3/4 in) sisi supply N2 pecah</li> </ul> |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Dilakukan penggantian bladder N2 baru</li> <li>Dilakukan penggantian filter baru 4 ea</li> <li>Penggantian flexible hose baru 1 ea</li> </ul> |   |

| No. | Sebelum  |  | Sesudah  |   |
|-----|--|--|--|---|
|     | Hasil Inspeksi   | Foto   | Tindakan   | Foto  |
| 40  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Kondisi Lifetime</li> <li>Kondisi flexible hose 1 in pecah</li> </ul>   |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Penggantian Piston baru 2 ea</li> <li>Untuk keandalan Unit.</li> <li>Dilakukan penggantian flexible hose baru</li> </ul>                              |   |
| 41  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Terjadi miss alignment</li> <li>Cooler mech seal kotor</li> <li>Flexible coupling HP BCP A dan B retak</li> </ul> |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Realignment</li> <li>Cleaning cooler mech seal</li> <li>Penggantian oil baru</li> <li>Cleaning pump</li> <li>Penggantian Flexible coupling</li> </ul> |  |



| No. | Sebelum   |   | Sesudah   |   |
|-----|---|---|---|---|
|     | Hasil Inspeksi  | Foto  | Tindakan  | Foto  |
|     |   |   | baru 4 ea   |   |
| 42  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Seat dan disc scratched</li> </ul>                   |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lapping Disc dan Seat</li> <li>• Contact Check OK</li> </ul> |   |
| 43  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kondisi expansion joint sobek pada fabric</li> </ul> |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dilakukan perbaikan pada bagian yang sobek</li> </ul>        |   |



## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil perhitungan dan analisis performa turbin gas blok GT 3.2 dan GT 3.3 sebelum dan sesudah *turbine inspection* pada bab IV dapat diambil kesimpulan yang berkaitan dengan *turbine inspection* yang mempengaruhi performa dari turbin gas blok GT 3.2 dan GT 3.3 pada PT. PJB Unit Pembangkitan Gresik. Kesimpulan yang bisa didapatkan dari perhitungan dan analisis bab IV adalah sebagai berikut :

1. Efisiensi sesudah *turbine inspection* mengalami kenaikan pada GT 3.2 maupun GT 3.3 . Kenaikan efisiensi ini terjadi pada setiap pembebanan (*load*). Pada GT 3.2 kenaikan efisiensi sekitar 1,6 % dan pada GT 3.3 sekitar 2,1 % .
2. Heat rate sesudah *turbine inspection* mengalami penurunan pada GT 3.2 maupun GT 3.3. Pada GT 3.3 penurunan *heat rate* rata-rata sebesar 134,56 kcal/kWh dan pada GT 3.2 mengalami penurunan *heat rate* rata-rata sebesar 160,22 kcal/kWh.
3. Untuk perbandingan *air fuel ratio* antara turbin gas sebelum dan sesudah *turbine inspection* ,mengalami penurunan rasio. Pada GT 3.2 penurunan AFR rata-rata sekitar 3,87 % . Pada GT 3.3 penurunan AFR rata-rata sekitar 4,5 %.
4. Konsumsi bahan bakar antara turbin gas sebelum dan sesudah dilakukan *turbine inspection* mengalami penurunan. Pada GT 3.2 penurunan SFC rata-rata sekitar 0.0265 kg/kWh. Pada GT 3.3 penurunan SFC rata-rata sebesar 0.016 kg/kWh.
5. Pengaruh *overhaul turbine inspection* terhadap performa turbin gas cukup signifikan. Dengan adanya penurunan SFC serta meningkatnya efisiensi dari turbin gas, maka



akan berdampak pada biaya produksi yang semakin hemat dan penurunan dari sebelumnya.

## 5.2 Saran

Berdasarkan perhitungan, analisis, dan kesimpulan dapat diambil beberapa saran yang ditujukan kepada PT. PJB Unit Pembangkitan Gresik dan untuk penelitian selanjutnya.

- PT. PJB Unit Pembangkitan Gresik
  1. Perlu dipasangkan alat-alat pengukur yang terdapat di setiap peralatan yang ada di dalam turbin gas dan bisa langsung diakses dari *central control room* (CCR) untuk mengetahui kinerja setiap peralatan yang ada agar lebih spesifik lagi data yang ada.
  2. Perlu dilakukan perhitungan performa secara rutin dan spesifik oleh pihak PT. PJB Unit Pembangkitan Gresik agar performanya terjaga dengan baik.
  3. Perlu dikaji ulang tentang hasil dari *turbine inspection*. Akan lebih baik jika konsumsi bahan pada GT 3.3 pada beban 100 MW terjadi penurunan sehingga pengaruh *turbine inspection* mengalami penurunan yang stabil pada variasi beban yang berbeda, karena yang difokuskan untuk ditekan nilainya adalah kebutuhan akan bahan bakar gas yang ada di dalam *gas turbine*. Jika penggunaan bahan bakar lebih efisien dan juga dapat menghasilkan *flue gas* yang efisien pula maka sistem tersebut bisa dikatakan sistem yang maksimal dan baik.
- Untuk penelitian selanjutnya  
Perlu dihitung kembali performa turbin gas akan tetapi dengan mempertimbangkan atau menganalisa dari perpindahan panas yang terdapat di dalam pada sistem . Dan tentunya dengan didukung oleh data operasi yang cukup lengkap.

## Lampiran 1 : Konversi Satuan

TABLE A.1

Conversion Factors

**Area (*A*)**

$$1 \text{ mm}^2 = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ cm}^2 = 1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 0.1550 \text{ in}^2$$

$$1 \text{ m}^2 = 10.7639 \text{ ft}^2$$

$$1 \text{ ft}^2 = 144 \text{ in}^2$$

$$1 \text{ m}^2 = 6.4516 \text{ cm}^2 = 6.4516 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ ft}^2 = 0.092903 \text{ m}^2$$

**Conductivity (*k*)**

$$1 \text{ W/m}\cdot\text{K} = 1 \text{ J/s}\cdot\text{m}\cdot\text{K} \\ = 0.5777789 \text{ Btu/h}\cdot\text{ft}\cdot^\circ\text{R}$$

$$1 \text{ Btu/h}\cdot\text{ft}\cdot^\circ\text{R} = 1.730735 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

**Density ( $\rho$ )**

$$1 \text{ kg/m}^3 = 0.06242797 \text{ lbm/ft}^3$$

$$1 \text{ lbm/ft}^3 = 16.01846 \text{ kg/m}^3$$

$$1 \text{ g/cm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$1 \text{ g/cm}^3 = 1 \text{ kg/L}$$

**Energy (*E*, *U*)**

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N}\cdot\text{m} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$$

$$1 \text{ J} = 0.737562 \text{ lbf}\cdot\text{ft}$$

$$1 \text{ cal (Int.)} = 4.18681 \text{ J}$$

$$1 \text{ lbf}\cdot\text{ft} = 1.355818 \text{ J}$$

$$= 1.28507 \times 10^{-3} \text{ Btu}$$

$$1 \text{ Btu (Int.)} = 1.055056 \text{ kJ}$$

$$= 778.1693 \text{ lbf}\cdot\text{ft}$$

$$1 \text{ erg} = 1.0 \times 10^{-7} \text{ J}$$

$$1 \text{ eV} = 1.60217733 \times 10^{-19} \text{ J}$$

**Force (*F*)**

$$1 \text{ N} = 0.224809 \text{ lbf}$$

$$1 \text{ kp} = 9.80665 \text{ N (1 kgf)}$$

$$1 \text{ lbf} = 4.448222 \text{ N}$$

**Gravitation**

$$g = 9.80665 \text{ m/s}^2$$

$$g = 32.17405 \text{ ft/s}^2$$

**Heat capacity ( $C_p$ ,  $C_r$ ,  $C$ ), specific entropy ( $s$ )**

$$1 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} = 0.238846 \text{ Btu/lbm}\cdot^\circ\text{R}$$

$$1 \text{ Btu/lbm}\cdot^\circ\text{R} = 4.1868 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

**Heat flux (per unit area)**

$$1 \text{ W/m}^2 = 0.316998 \text{ Btu/h}\cdot\text{ft}^2$$

$$1 \text{ Btu/h}\cdot\text{ft}^2 = 3.15459 \text{ W/m}^2$$

## Lampiran 1 : Konversi Satuan (lanjutan)

TABLE A.1 (continued)

Conversion Factors

Heat-transfer coefficient ( $h$ )

$$1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} = 0.17611 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{R}$$

$$1 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{R} = 5.67826 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Length ( $L$ )

$$1 \text{ mm} = 0.001 \text{ m} = 0.1 \text{ cm}$$

$$1 \text{ ft} = 12 \text{ in.}$$

$$1 \text{ cm} = 0.01 \text{ m} = 10 \text{ mm} = 0.3937 \text{ in.}$$

$$1 \text{ in.} = 2.54 \text{ cm} = 0.0254 \text{ m}$$

$$1 \text{ m} = 3.28084 \text{ ft} = 39.370 \text{ in.}$$

$$1 \text{ ft} = 0.3048 \text{ m}$$

$$1 \text{ km} = 0.621371 \text{ mi}$$

$$1 \text{ mi} = 1.609344 \text{ km}$$

$$1 \text{ mi} = 1609.3 \text{ m (US statute)}$$

$$1 \text{ yd} = 0.9144 \text{ m}$$

Mass ( $m$ )

$$1 \text{ kg} = 2.204623 \text{ lbm}$$

$$1 \text{ lbm} = 0.453592 \text{ kg}$$

$$1 \text{ mmHg} = 1000 \text{ kg}$$

$$1 \text{ slug} = 14.5939 \text{ kg}$$

$$1 \text{ grain} = 6.47989 \times 10^{-5} \text{ kg}$$

$$1 \text{ ton} = 2000 \text{ lbm}$$

Moment (torque,  $T$ )

$$1 \text{ N} \cdot \text{m} = 0.737562 \text{ lbf} \cdot \text{ft}$$

$$1 \text{ lbf} \cdot \text{ft} = 1.355818 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Momentum ( $mV$ )

$$1 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 7.23294 \text{ lbfm} \cdot \text{ft/s}$$

$$1 \text{ lbfm} \cdot \text{ft/s} = 0.138256 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

$$= 0.224809 \text{ lbf} \cdot \text{s}$$

Power ( $Q$ ,  $\dot{W}$ )

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ N} \cdot \text{m/s}$$

$$1 \text{ lbf} \cdot \text{ft/s} = 1.355818 \text{ W}$$

$$= 0.737562 \text{ lbf} \cdot \text{ft/s}$$

$$= 4.52624 \text{ Btu/h}$$

$$\text{Btu/h} = 3412.14 \text{ Btu/h}$$

$$1 \text{ Btu/s} = 1.055066 \text{ kW}$$

$$1 \text{ hp (metric)} = 0.735499 \text{ kW}$$

$$1 \text{ hp (UK)} = 0.7457 \text{ kW}$$

$$= 550 \text{ lbf} \cdot \text{ft/s}$$

$$= 2544.43 \text{ Btu/h}$$

$$1 \text{ ton of}$$

$$1 \text{ ton of}$$

$$\text{refrigeration} = 3.51685 \text{ kW}$$

$$\text{refrigeration} = 12,000 \text{ Btu/h}$$

Pressure ( $P$ )

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ kg/m} \cdot \text{s}^2$$

$$1 \text{ lbf/in}^2 = 6.894757 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ bar} = 1.0 \times 10^5 \text{ Pa} = 100 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ atm} = 14.69594 \text{ lbf/in}^2$$

$$1 \text{ atm} = 101.325 \text{ kPa}$$

$$= 29.921 \text{ in. Hg } [32^\circ\text{F}]$$

$$= 1.01325 \text{ bar}$$

$$= 33.8995 \text{ ft H}_2\text{O } [4^\circ\text{C}]$$

$$= 760 \text{ mm Hg } [0^\circ\text{C}]$$

$$= 10.33256 \text{ m H}_2\text{O } [4^\circ\text{C}]$$

$$1 \text{ torr} = 1 \text{ mm Hg } [0^\circ\text{C}]$$

$$1 \text{ in. Hg } [0^\circ\text{C}] = 0.49115 \text{ lbf/in}^2$$

$$1 \text{ mm Hg } [0^\circ\text{C}] = 0.133322 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ in. H}_2\text{O } [4^\circ\text{C}] = 0.036126 \text{ lbf/in}^2$$

$$1 \text{ m H}_2\text{O } [4^\circ\text{C}] = 9.80638 \text{ kPa}$$

Specific energy ( $e$ ,  $u$ )

$$1 \text{ kJ/kg} = 0.42992 \text{ Btu/lbm}$$

$$1 \text{ Btu/lbm} = 2.326 \text{ kJ/kg}$$

$$= 334.55 \text{ lbf} \cdot \text{ft/lbm}$$

$$1 \text{ lbf} \cdot \text{ft/lbm} = 2.98907 \times 10^{-2} \text{ kJ/kg}$$

$$= 1.28507 \times 10^{-3} \text{ Btu/lbm}$$



## Lampiran 1 : Konversi Satuan (lanjutan)

TABLE A.1 (continued)

### Conversion Factors

#### Specific kinetic energy ( $\frac{1}{2} V^2$ )

$$1 \text{ m}^2/\text{s}^2 = 0.001 \text{ kJ/kg}$$

$$1 \text{ kJ/kg} = 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$1 \text{ ft}^2/\text{s}^2 = 3.9941 \times 10^{-6} \text{ Btu/lbm}$$

$$1 \text{ Btu/lbm} = 25037 \text{ ft}^2/\text{s}^2$$

#### Specific potential energy ( $Zg$ )

$$1 \text{ m} \cdot g_{\text{avg}} = 9.80665 \times 10^{-3} \text{ kJ/kg}$$

$$= 4.21607 \times 10^{-5} \text{ Btu/lbm}$$

$$1 \text{ ft} \cdot g_{\text{avg}} = 1.0 \text{ lbf} \cdot \text{ft}/\text{lbm}$$

$$= 0.001285 \text{ Btu/lbm}$$

$$= 0.002989 \text{ kJ/kg}$$

#### Specific volume ( $v$ )

$$1 \text{ cm}^3/\text{g} = 0.001 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$1 \text{ cm}^3/\text{g} = 1 \text{ L/kg}$$

$$1 \text{ m}^3/\text{kg} = 16.01846 \text{ ft}^3/\text{lbm}$$

$$1 \text{ ft}^3/\text{lbm} = 0.062428 \text{ m}^3/\text{kg}$$

#### Temperature ( $T$ )

$$1 \text{ K} = 1^\circ\text{C} = 1.8 \text{ R} = 1.8 \text{ F}$$

$$\text{TC} = \text{TK} - 273.15$$

$$= (\text{TF} - 32)/1.8$$

$$\text{TK} = \text{TR}/1.8$$

$$1 \text{ R} = (5/9) \text{ K}$$

$$\text{TF} = \text{TR} - 459.67$$

$$= 1.8 \text{ TC} + 32$$

$$\text{TR} = 1.8 \text{ TK}$$

#### Universal Gas Constant

$$R = R_u = 8.31451 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$$

$$= 1.98589 \text{ kcal/kmol} \cdot \text{K}$$

$$= 82.0578 \text{ atm} \cdot \text{L/kmol} \cdot \text{K}$$

$$R = 1.98589 \text{ Btu/lbmol} \cdot \text{R}$$

$$= 1545.36 \text{ lbf} \cdot \text{ft/lbmol} \cdot \text{R}$$

$$= 0.73024 \text{ atm} \cdot \text{ft}^3/\text{lbmol} \cdot \text{R}$$

$$= 10.7317 (\text{lbf} \cdot \text{ft}/\text{in}^2) \cdot \text{ft}^3/\text{lbmol} \cdot \text{R}$$

#### Velocity ( $V$ )

$$1 \text{ m/s} = 3.6 \text{ km/h}$$

$$= 3.28084 \text{ ft/s}$$

$$= 2.23694 \text{ mi/h}$$

$$1 \text{ km/h} = 0.277778 \text{ m/s}$$

$$= 0.91134 \text{ ft/s}$$

$$= 0.62137 \text{ mi/h}$$

$$1 \text{ ft/s} = 0.681818 \text{ mi/h}$$

$$= 0.3048 \text{ m/s}$$

$$= 1.09728 \text{ km/h}$$

$$1 \text{ mi/h} = 1.46667 \text{ ft/s}$$

$$= 0.44704 \text{ m/s}$$

$$= 1.609344 \text{ km/h}$$

#### Volume ( $V$ )

$$1 \text{ m}^3 = 35.3147 \text{ ft}^3$$

$$1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3 = 0.001 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ Gal (US)} = 3.785412 \text{ L}$$

$$= 3.785412 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$1 \text{ ft}^3 = 2.831685 \times 10^{-2} \text{ m}^3$$

$$1 \text{ in}^3 = 1.6387 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$1 \text{ Gal (UK)} = 4.546090 \text{ L}$$

$$1 \text{ Gal (US)} = 231.00 \text{ in}^3$$

## Lampiran 2 : Properties pada Udara (Ideal)

TABLE A-22 Ideal Gas Properties of Air

| T(K), $h$ and $u$ (kJ/kg), $s^\circ$ (kJ/kg · K) |        |        |           |                       |       |     |        |        |           |                     |       |
|--|--------|--------|-----------|-----------------------|-------|-----|--------|--------|-----------|---------------------|-------|
| T  | $h$    | $u$    | $s^\circ$ | when $\Delta s = 0^1$ |       | T   | $h$    | $u$    | $s^\circ$ | when $\Delta s = 0$ |       |
|  |        |        |           | $P_r$                 | $v_r$ |     |        |        |           | $P_r$               | $v_r$ |
| 200  | 199.97 | 142.56 | 1.29559   | 0.3363                | 1707. | 450 | 451.80 | 322.62 | 2.11161   | 5.775               | 223.6 |
| 210  | 209.97 | 149.69 | 1.34444   | 0.3987                | 1512. | 460 | 462.02 | 329.97 | 2.13407   | 6.245               | 211.4 |
| 220  | 219.97 | 156.82 | 1.39105   | 0.4690                | 1346. | 470 | 472.24 | 337.32 | 2.15604   | 6.742               | 200.1 |
| 230  | 230.02 | 164.00 | 1.43557   | 0.5477                | 1205. | 480 | 482.49 | 344.70 | 2.17760   | 7.268               | 189.5 |
| 240  | 240.02 | 171.13 | 1.47824   | 0.6355                | 1084. | 490 | 492.74 | 352.08 | 2.19876   | 7.824               | 179.7 |
| 250  | 250.05 | 178.28 | 1.51917   | 0.7329                | 979.  | 500 | 503.02 | 359.49 | 2.21952   | 8.411               | 170.6 |
| 260  | 260.09 | 185.45 | 1.55848   | 0.8405                | 887.8 | 510 | 513.32 | 366.92 | 2.23993   | 9.031               | 162.1 |
| 270  | 270.11 | 192.60 | 1.59634   | 0.9590                | 808.0 | 520 | 523.63 | 374.36 | 2.25997   | 9.684               | 154.1 |
| 280  | 280.13 | 199.75 | 1.63279   | 1.0889                | 738.0 | 530 | 533.98 | 381.84 | 2.27967   | 10.37               | 146.7 |
| 285  | 285.14 | 203.33 | 1.65055   | 1.1584                | 706.1 | 540 | 544.35 | 389.34 | 2.29906   | 11.10               | 139.7 |
| 290  | 290.16 | 206.91 | 1.66802   | 1.2311                | 676.1 | 550 | 554.74 | 396.86 | 2.31809   | 11.86               | 133.1 |
| 295  | 295.17 | 210.49 | 1.68515   | 1.3068                | 647.9 | 560 | 565.17 | 404.42 | 2.33685   | 12.66               | 127.0 |
| 300  | 300.19 | 214.07 | 1.70203   | 1.3860                | 621.2 | 570 | 575.59 | 411.97 | 2.35531   | 13.50               | 121.2 |
| 305  | 305.22 | 217.67 | 1.71865   | 1.4686                | 596.0 | 580 | 586.04 | 419.55 | 2.37348   | 14.38               | 115.7 |
| 310  | 310.24 | 221.25 | 1.73498   | 1.5546                | 572.3 | 590 | 596.52 | 427.15 | 2.39140   | 15.31               | 110.6 |
| 315  | 315.27 | 224.85 | 1.75106   | 1.6442                | 549.8 | 600 | 607.02 | 434.78 | 2.40902   | 16.28               | 105.8 |
| 320  | 320.29 | 228.42 | 1.76690   | 1.7375                | 528.6 | 610 | 617.53 | 442.42 | 2.42644   | 17.30               | 101.2 |
| 325  | 325.31 | 232.02 | 1.78249   | 1.8345                | 508.4 | 620 | 628.07 | 450.09 | 2.44356   | 18.36               | 96.92 |
| 330  | 330.34 | 235.61 | 1.79783   | 1.9352                | 489.4 | 630 | 638.63 | 457.78 | 2.46048   | 19.44               | 92.84 |
| 340  | 340.42 | 242.82 | 1.82790   | 2.149                 | 454.1 | 640 | 649.22 | 465.50 | 2.47716   | 20.64               | 88.99 |
| 350  | 350.49 | 250.02 | 1.85708   | 2.379                 | 422.2 | 650 | 659.84 | 473.25 | 2.49364   | 21.86               | 85.34 |
| 360  | 360.58 | 257.24 | 1.88543   | 2.626                 | 393.4 | 660 | 670.47 | 481.01 | 2.50985   | 23.13               | 81.89 |
| 370  | 370.67 | 264.46 | 1.91313   | 2.892                 | 367.2 | 670 | 681.14 | 488.81 | 2.52589   | 24.46               | 78.61 |
| 380  | 380.77 | 271.69 | 1.94001   | 3.176                 | 343.4 | 680 | 691.82 | 496.62 | 2.54175   | 25.85               | 75.50 |
| 390  | 390.88 | 278.93 | 1.96633   | 3.481                 | 321.5 | 690 | 702.52 | 504.45 | 2.55731   | 27.29               | 72.56 |
| 400  | 400.98 | 286.16 | 1.99194   | 3.806                 | 301.6 | 700 | 713.27 | 512.33 | 2.57277   | 28.80               | 69.76 |
| 410  | 411.12 | 293.43 | 2.01699   | 4.153                 | 283.3 | 710 | 724.04 | 520.23 | 2.58810   | 30.38               | 67.07 |
| 420  | 421.26 | 300.69 | 2.04142   | 4.522                 | 266.6 | 720 | 734.82 | 528.14 | 2.60319   | 32.02               | 64.53 |
| 430  | 431.43 | 307.99 | 2.06533   | 4.915                 | 251.1 | 730 | 745.62 | 536.07 | 2.61803   | 33.72               | 62.13 |
| 440  | 441.61 | 315.30 | 2.08870   | 5.332                 | 236.8 | 740 | 756.44 | 544.02 | 2.63280   | 35.50               | 59.82 |

1.  $P_r$  and  $v_r$  data are used with Eqs. 6.43 and 6.44, respectively.

## Lampiran 2 : Properties pada Udara (Ideal)

TABLE A-22 (Continued)

| T(K), $\hat{h}$ and $\hat{u}$ (kJ/kg), $s^{\circ}$ (kJ/kg · K) |           |           |             |                             |        |      |           |           |             |                     |        |
|--|-----------|-----------|-------------|-----------------------------|--------|------|-----------|-----------|-------------|---------------------|--------|
| T  | $\hat{h}$ | $\hat{u}$ | $s^{\circ}$ | when $\Delta s = 0^{\circ}$ |        | T    | $\hat{h}$ | $\hat{u}$ | $s^{\circ}$ | when $\Delta s = 0$ |        |
|  |           |           |             | $p_r$                       | $v_r$  |      |           |           |             | $p_r$               | $v_r$  |
| 750  | 767.29    | 551.99    | 2.64737     | 57.35                       | 57.63  | 1300 | 1395.97   | 1022.82   | 3.27345     | 330.9               | 11.275 |
| 760  | 778.18    | 560.01    | 2.66176     | 39.27                       | 55.54  | 1320 | 1419.76   | 1040.88   | 3.29160     | 352.5               | 10.747 |
| 770  | 789.11    | 568.07    | 2.67595     | 41.31                       | 53.30  | 1340 | 1443.60   | 1058.94   | 3.30959     | 375.3               | 10.247 |
| 780  | 800.03    | 576.12    | 2.69013     | 43.35                       | 51.64  | 1360 | 1467.49   | 1077.10   | 3.32724     | 399.1               | 9.780  |
| 790  | 810.99    | 584.21    | 2.70400     | 45.55                       | 49.86  | 1380 | 1491.44   | 1095.26   | 3.34474     | 424.2               | 9.337  |
| 800  | 821.95    | 592.30    | 2.71787     | 47.75                       | 48.08  | 1400 | 1515.42   | 1113.52   | 3.36200     | 450.5               | 8.919  |
| 820  | 843.98    | 608.59    | 2.74504     | 52.59                       | 44.84  | 1420 | 1539.44   | 1131.77   | 3.37901     | 478.0               | 8.526  |
| 840  | 866.08    | 624.95    | 2.77170     | 57.60                       | 41.85  | 1440 | 1563.51   | 1150.13   | 3.39586     | 506.9               | 8.153  |
| 860  | 888.27    | 641.40    | 2.79783     | 63.09                       | 39.12  | 1460 | 1587.63   | 1168.49   | 3.41247     | 537.1               | 7.801  |
| 880  | 910.56    | 657.95    | 2.82344     | 68.98                       | 36.61  | 1480 | 1611.79   | 1186.95   | 3.42892     | 568.8               | 7.468  |
| 900  | 932.93    | 674.58    | 2.84856     | 75.29                       | 34.31  | 1500 | 1635.97   | 1205.41   | 3.44516     | 601.9               | 7.152  |
| 920  | 955.38    | 691.28    | 2.87324     | 82.05                       | 32.18  | 1520 | 1660.23   | 1223.87   | 3.46120     | 636.5               | 6.854  |
| 940  | 977.92    | 708.06    | 2.89748     | 89.28                       | 30.22  | 1540 | 1684.51   | 1242.43   | 3.47712     | 672.8               | 6.569  |
| 960  | 1000.55   | 725.02    | 2.92128     | 97.00                       | 28.40  | 1560 | 1708.82   | 1260.99   | 3.49276     | 710.5               | 6.301  |
| 980  | 1023.25   | 741.98    | 2.94468     | 105.2                       | 26.73  | 1580 | 1733.17   | 1279.65   | 3.50829     | 750.0               | 6.046  |
| 1000   | 1046.04   | 758.94    | 2.96770     | 114.0                       | 25.17  | 1600 | 1757.57   | 1298.30   | 3.52364     | 791.2               | 5.804  |
| 1020   | 1068.89   | 776.10    | 2.99034     | 123.4                       | 23.72  | 1620 | 1782.00   | 1316.96   | 3.53879     | 834.1               | 5.574  |
| 1040   | 1091.85   | 793.36    | 3.01260     | 133.3                       | 22.39  | 1640 | 1806.46   | 1335.72   | 3.55381     | 878.9               | 5.355  |
| 1060   | 1114.86   | 810.62    | 3.03449     | 143.9                       | 21.14  | 1660 | 1830.96   | 1354.48   | 3.56867     | 925.6               | 5.147  |
| 1080   | 1137.89   | 827.88    | 3.05608     | 155.2                       | 19.98  | 1680 | 1855.50   | 1373.24   | 3.58335     | 974.2               | 4.949  |
| 1100   | 1161.07   | 845.33    | 3.07732     | 167.1                       | 18.896 | 1700 | 1880.1    | 1392.7    | 3.5979      | 1025                | 4.761  |
| 1120   | 1184.28   | 862.79    | 3.09825     | 179.7                       | 17.886 | 1750 | 1941.6    | 1439.8    | 3.6336      | 1161                | 4.328  |
| 1140   | 1207.57   | 880.35    | 3.11883     | 193.1                       | 16.946 | 1800 | 2003.3    | 1487.2    | 3.6684      | 1310                | 3.944  |
| 1160   | 1230.92   | 897.91    | 3.13916     | 207.2                       | 16.064 | 1850 | 2065.3    | 1534.9    | 3.7023      | 1475                | 3.601  |
| 1180   | 1254.34   | 915.57    | 3.15916     | 222.2                       | 15.241 | 1900 | 2127.4    | 1582.6    | 3.7354      | 1655                | 3.295  |
| 1200   | 1277.79   | 933.33    | 3.17888     | 238.0                       | 14.470 | 1950 | 2189.7    | 1630.6    | 3.7677      | 1852                | 3.022  |
| 1220   | 1301.31   | 951.09    | 3.19834     | 254.7                       | 13.747 | 2000 | 2252.1    | 1678.7    | 3.7994      | 2068                | 2.776  |
| 1240   | 1324.93   | 968.95    | 3.21751     | 272.3                       | 13.069 | 2050 | 2314.6    | 1726.8    | 3.8303      | 2303                | 2.555  |
| 1260   | 1348.55   | 986.90    | 3.23638     | 290.8                       | 12.435 | 2100 | 2377.4    | 1775.3    | 3.8605      | 2559                | 2.356  |
| 1280   | 1372.24   | 1004.76   | 3.25510     | 310.4                       | 11.835 | 2150 | 2440.3    | 1823.8    | 3.8901      | 2837                | 2.175  |
|  |           |           |             |                             |        | 2200 | 2503.2    | 1872.4    | 3.9191      | 3138                | 2.012  |
|  |           |           |             |                             |        | 2250 | 2566.4    | 1921.3    | 3.9474      | 3464                | 1.864  |

Source: Tables A-22 are based on J. H. Keenan and J. Keyes, Gas Tables, Wiley, New York, 1945.



**Lampiran 3 :** Perhitungan Properties di Tiap Titik pada GT 3.2 sebelum *Turbine Inspection*

| No.         | Beban  | Titik | Temperatur (T) | Tekanan (P) | Enthalpy (h) |
|-------------|--------|-------|----------------|-------------|--------------|
| 1           | 50 MW  | 1     | 302.97         | 100.129     | 301.59       |
| 2           |        | 2     | 635.33         | 931.665     | 696.81       |
| 3           |        | 3     | 1257.31        | 970.83      | 1635.22      |
| 4           |        | 4     | 748            | 102.87      | 972.82       |
| 5           | 75 MW  | 1     | 303.8          | 100.52      | 301.59       |
| 6           |        | 2     | 655.33         | 990.557     | 696.81       |
| 7           |        | 3     | 1335.88        | 1029.73     | 1737.35      |
| 8           |        | 4     | 784            | 102.87      | 1019.64      |
| 9           | 100 MW | 1     | 306.2          | 100.61      | 301.59       |
| 10          |        | 2     | 687.33         | 1343.55     | 696.81       |
| 11          |        | 3     | 1442.463       | 1402.41     | 1876.02      |
| 12          |        | 4     | 788.33         | 102.87      | 1025.27      |
| Satuan Unit |        |       | °K             | kPa         | kJ/kg        |

#### Lampiran 4 : Perhitungan Properties di Tiap Titik pada GT 3.2 setelah *Turbine Inspection*

| No.         | Beban  | Titik | Temperatur (T) | Tekanan (P) | Enthalpy (h) |
|-------------|--------|-------|----------------|-------------|--------------|
| 1           | 50 MW  | 1     | 299.97         | 100.13      | 301.60       |
| 2           |        | 2     | 625.67         | 931.67      | 696.82       |
| 3           |        | 3     | 1205.76        | 970.89      | 1568.18      |
| 4           |        | 4     | 717.33         | 102.29      | 932.94       |
| 5           | 75 MW  | 1     | 301.20         | 100.52      | 301.60       |
| 6           |        | 2     | 642.33         | 990.51      | 696.82       |
| 7           |        | 3     | 1312.23        | 1029.74     | 1706.65      |
| 8           |        | 4     | 771.67         | 103.17      | 1003.61      |
| 9           | 100 MW | 1     | 302.60         | 100.62      | 301.60       |
| 10          |        | 2     | 670.67         | 1343.56     | 696.82       |
| 11          |        | 3     | 1383.61        | 1402.40     | 1799.49      |
| 12          |        | 4     | 756.67         | 102.58      | 984.10       |
| Satuan Unit |        |       | °K             | kPa         | kJ/kg        |



**Lampiran 5 :** Perhitungan Properties di Tiap Titik pada GT 3.3 sebelum *Turbine Inspection*

| No.         | Beban  | Titik | Temperatur (T) | Tekanan (P) | Enthalpy (h) |
|-------------|--------|-------|----------------|-------------|--------------|
| 1           | 50 MW  | 1     | 301.87         | 100.13      | 301.60       |
| 2           |        | 2     | 676.00         | 931.67      | 696.82       |
| 3           |        | 3     | 1276.93        | 970.89      | 1660.74      |
| 4           |        | 4     | 759.67         | 102.29      | 988.00       |
| 5           | 100 MW | 1     | 303.60         | 100.52      | 301.60       |
| 6           |        | 2     | 685.33         | 990.51      | 696.82       |
| 7           |        | 3     | 1346.24        | 1029.74     | 1750.88      |
| 8           |        | 4     | 791.67         | 103.17      | 1029.62      |
| 9           | Maks.  | 1     | 302.90         | 100.62      | 301.60       |
| 10          |        | 2     | 685.67         | 1343.56     | 696.82       |
| 11          |        | 3     | 1464.07        | 1402.40     | 1904.13      |
| 12          |        | 4     | 800.67         | 102.58      | 1041.33      |
| Satuan Unit |        |       | °K             | kPa         | kJ/kg        |



**Lampiran 6 :** Perhitungan Properties di Tiap Titik pada GT 3.3 setelah *Turbine Inspection*

| No.         | Beban  | Titik | Temperatur (T) | Tekanan (P) | Enthalpy (h) |
|-------------|--------|-------|----------------|-------------|--------------|
| 1           | 50 MW  | 1     | 298.17         | 100.13      | 301.60       |
| 2           |        | 2     | 657.00         | 931.67      | 696.82       |
| 3           |        | 3     | 1252.83        | 970.89      | 1629.39      |
| 4           |        | 4     | 745.33         | 102.29      | 969.35       |
| 5           | 100 MW | 1     | 298.10         | 100.52      | 301.60       |
| 6           |        | 2     | 664.00         | 990.51      | 696.82       |
| 7           |        | 3     | 1292.39        | 1029.74     | 1680.84      |
| 8           |        | 4     | 760.00         | 103.17      | 988.43       |
| 9           | Maks.  | 1     | 300.33         | 100.62      | 301.60       |
| 10          |        | 2     | 676.00         | 1343.56     | 696.82       |
| 11          |        | 3     | 1450.65        | 1402.40     | 1886.67      |
| 12          |        | 4     | 793.33         | 102.58      | 1031.78      |
| Satuan Unit |        |       | °K             | kPa         | kJ/kg        |

## Lampiran 7 : Performa pada GT 3.2 sebelum dan sesudah TI

| No. | Beban  | Properties        | Nilai     | Satuan      |
|-----|--------|-------------------|-----------|-------------|
| 1   | 50 MW  | $\dot{W}_c$       | 73700.22  | kW          |
| 2   |        | $\dot{W}_t$       | 126831.15 | kW          |
| 3   |        | $\dot{W}_{netto}$ | 53130.93  | kW          |
| 4   |        | $Q_{input}$       | 229754.47 | kW          |
| 5   |        | T2s               | 573.02    | $^{\circ}K$ |
| 6   | 75 MW  | T4s               | 664.77    | $^{\circ}K$ |
| 7   |        | $\dot{W}_c$       | 89057.26  | kW          |
| 8   |        | $\dot{W}_t$       | 166217.87 | kW          |
| 9   |        | $\dot{W}_{netto}$ | 77160.61  | kW          |
| 10  |        | $Q_{input}$       | 287969.68 | kW          |
| 11  | 100 MW | T2s               | 584.08    | $^{\circ}K$ |
| 12  |        | T4s               | 694.82    | $^{\circ}K$ |
| 13  |        | $\dot{W}_c$       | 78404.87  | kW          |
| 14  |        | $\dot{W}_t$       | 175090.73 | kW          |
| 15  |        | $\dot{W}_{netto}$ | 96685.86  | kW          |
| 16  | 100 MW | $Q_{input}$       | 341697.94 | kW          |
| 17  |        | T2s               | 642.09    | $^{\circ}K$ |
| 18  |        | T4s               | 687.88    | $^{\circ}K$ |

| No. | Beban  | Properties        | Nilai     | Satuan      |
|-----|--------|-------------------|-----------|-------------|
| 1   | 50 MW  | $\dot{W}_c$       | 80663.95  | kW          |
| 2   |        | $\dot{W}_t$       | 132753.75 | kW          |
| 3   |        | $\dot{W}_{netto}$ | 52089.80  | kW          |
| 4   |        | $Q_{input}$       | 218236.53 | kW          |
| 5   |        | T2s               | 567.35    | $^{\circ}K$ |
| 6   | 75 MW  | T4s               | 637.52    | $^{\circ}K$ |
| 7   |        | $\dot{W}_c$       | 97498.90  | kW          |
| 8   |        | $\dot{W}_t$       | 177830.48 | kW          |
| 9   |        | $\dot{W}_{netto}$ | 80331.58  | kW          |
| 10  |        | $Q_{input}$       | 279338.76 | kW          |
| 11  | 100 MW | T2s               | 579.08    | $^{\circ}K$ |
| 12  |        | T4s               | 682.54    | $^{\circ}K$ |
| 13  |        | $\dot{W}_c$       | 89181.69  | kW          |
| 14  |        | $\dot{W}_t$       | 190000.44 | kW          |
| 15  |        | $\dot{W}_{netto}$ | 100818.75 | kW          |
| 16  | 100 MW | $Q_{input}$       | 329284.54 | kW          |
| 17  |        | T2s               | 634.54    | $^{\circ}K$ |
| 18  |        | T4s               | 659.82    | $^{\circ}K$ |



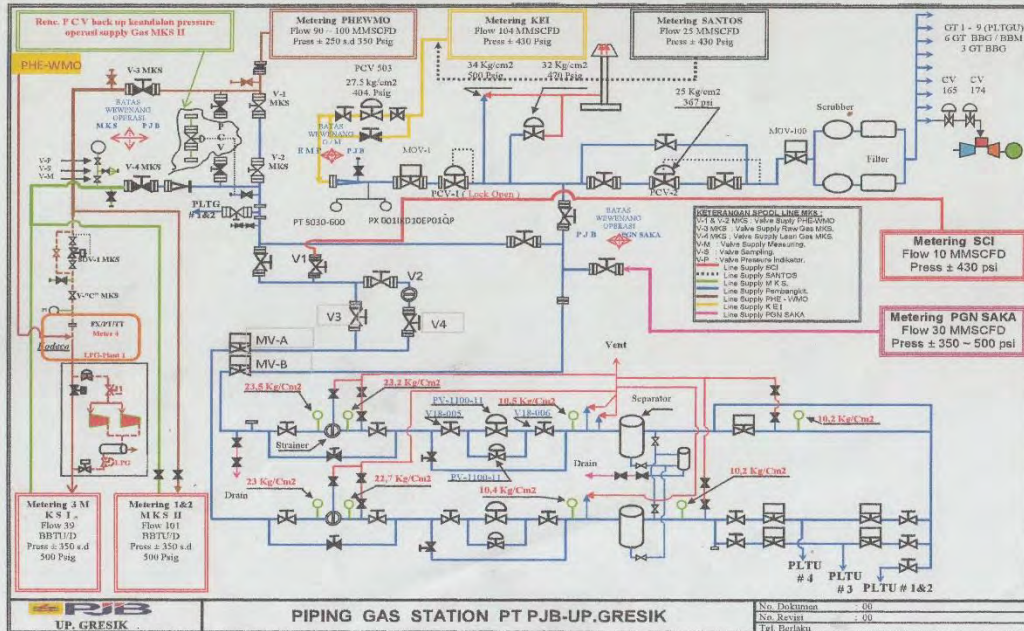
## Lampiran 8 : Performa pada GT 3.3 sebelum dan sesudah TI

| No. | Beban  | Properties        | Nilai     | Satuan      |
|-----|--------|-------------------|-----------|-------------|
| 1   | 50 MW  | $\dot{W}_c$       | 127707.01 | kW          |
| 2   |        | $\dot{W}_t$       | 222140.34 | kW          |
| 3   |        | $\dot{W}_{netto}$ | 94433.33  | kW          |
| 4   |        | $Q_{input}$       | 328949.62 | kW          |
| 5   |        | T2s               | 570.94    | $^{\circ}K$ |
| 6   | 100 MW | T4s               | 675.14    | $^{\circ}K$ |
| 7   |        | $\dot{W}_c$       | 115767.66 | kW          |
| 8   |        | $\dot{W}_t$       | 216837.66 | kW          |
| 9   |        | $\dot{W}_{netto}$ | 101070.00 | kW          |
| 10  |        | $Q_{input}$       | 358822.43 | kW          |
| 11  | Maks.  | T2s               | 583.70    | $^{\circ}K$ |
| 12  |        | T4s               | 700.23    | $^{\circ}K$ |
| 13  |        | $\dot{W}_c$       | 84157.36  | kW          |
| 14  |        | $\dot{W}_t$       | 190610.89 | kW          |
| 15  |        | $\dot{W}_{netto}$ | 106453.54 | kW          |
| 16  | Maks.  | $Q_{input}$       | 371143.51 | kW          |
| 17  |        | T2s               | 635.17    | $^{\circ}K$ |
| 18  |        | T4s               | 698.18    | $^{\circ}K$ |

| No. | Beban  | Properties        | Nilai     | Satuan      |
|-----|--------|-------------------|-----------|-------------|
| 1   | 50 MW  | $\dot{W}_c$       | 134628.51 | kW          |
| 2   |        | $\dot{W}_t$       | 229374.34 | kW          |
| 3   |        | $\dot{W}_{netto}$ | 94745.83  | kW          |
| 4   |        | $Q_{input}$       | 315261.97 | kW          |
| 5   |        | T2s               | 563.94    | $^{\circ}K$ |
| 6   | 100 MW | T4s               | 662.40    | $^{\circ}K$ |
| 7   |        | $\dot{W}_c$       | 133082.31 | kW          |
| 8   |        | $\dot{W}_t$       | 238317.73 | kW          |
| 9   |        | $\dot{W}_{netto}$ | 105235.42 | kW          |
| 10  |        | $Q_{input}$       | 341973.26 | kW          |
| 11  | Maks.  | T2s               | 573.12    | $^{\circ}K$ |
| 12  |        | T4s               | 672.21    | $^{\circ}K$ |
| 13  |        | $\dot{W}_c$       | 96139.40  | kW          |
| 14  |        | $\dot{W}_t$       | 215074.45 | kW          |
| 15  |        | $\dot{W}_{netto}$ | 118935.05 | kW          |
| 16  | Maks.  | $Q_{input}$       | 381753.59 | kW          |
| 17  |        | T2s               | 629.78    | $^{\circ}K$ |
| 18  |        | T4s               | 691.78    | $^{\circ}K$ |



## Lampiran 9 : Fuel System







Lampiran 11 : Heat & Mass Balance Diagram pada PLTGU Beban 75 MW

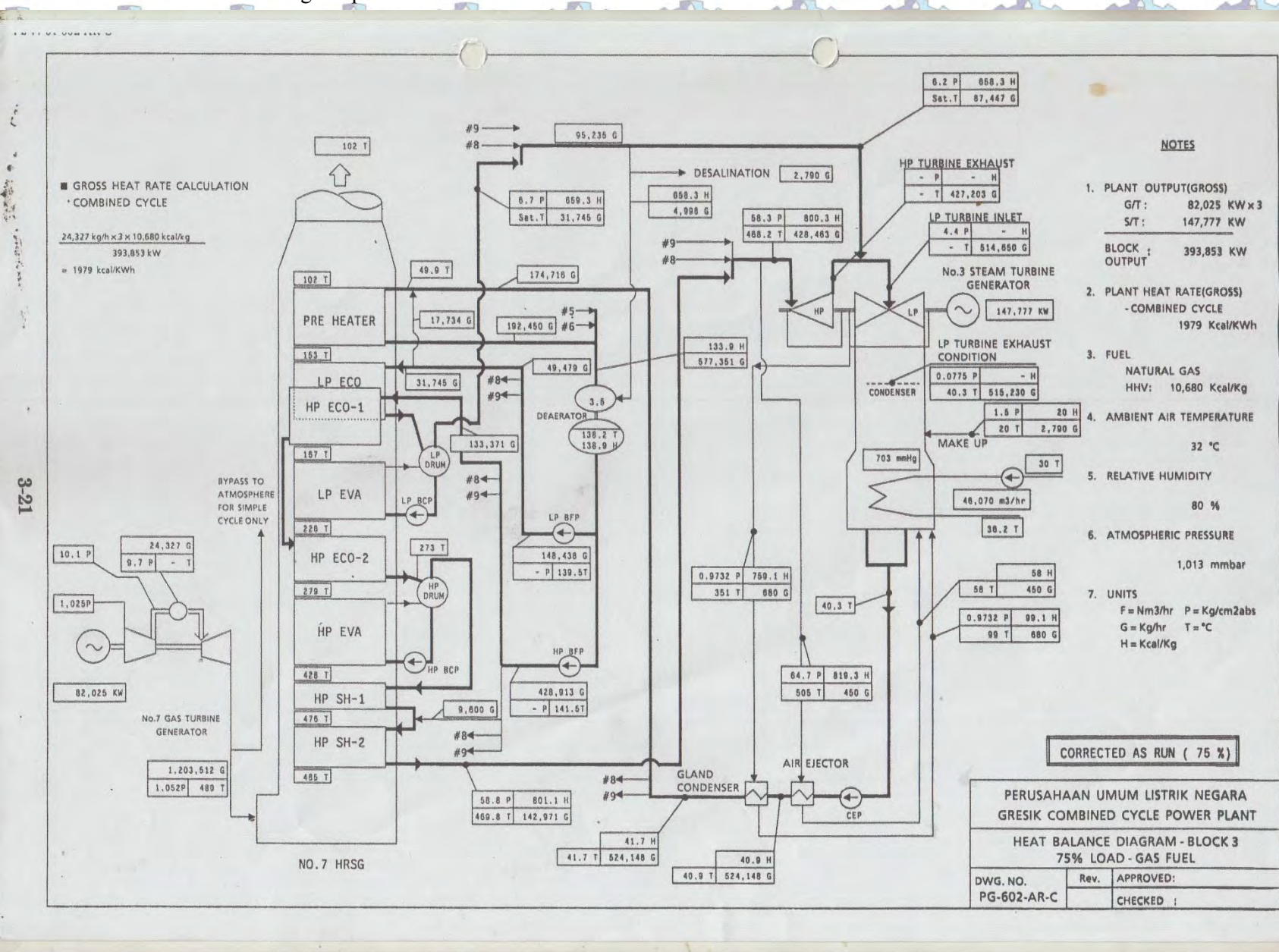




Diagram 12: Heat & Mass Balance Diagram pada PEPG Desalin 100 MW

**■ GROSS HEAT RATE CALCULATION  
COMBINED CYCLE**

$30,798 \text{ kg/hr} \times 3 \times 10,680 \text{ kcal/kg}$   
532,524 kW  
 $\approx 1,853 \text{ kcal/KWh}$

**NOTES**

- PLANT OUTPUT(GROSS)  
G/T : 113,097 KW x 3  
S/T : 193,234 KW  
BLOCK : 532,524 KW  
OUTPUT
- PLANT HEAT RATE(GROSS)  
- COMBINED CYCLE  
1853 Kcal/KWh
- FUEL  
NATURAL GAS  
HHV: 10,680 Kcal/Kg
- AMBIENT AIR TEMPERATURE  
32 °C
- RELATIVE HUMIDITY  
80 %
- ATMOSPHERIC PRESSURE  
1,013 mmbar
- UNITS  
F = Nm<sup>3</sup>/hr P = Kg/cm<sup>2</sup>abs  
G = Kg/hr T = °C  
H = Kcal/Kg

**CORRECTED AS RUN ( 100 % )**

**PERUSAHAAN UMUM LISTRIK NEGARA  
GRESIK COMBINED CYCLE POWER PLANT**

**HEAT BALANCE DIAGRAM - BLOCK 3  
GASE (100%) - FUEL GAS**

DWG. NO. PG-601-ARII -C Rev. APPROVED: CHECKED :

**Diagram Details:**

- Top Left:** Gross Heat Rate Calculation for Combined Cycle:  $30,798 \text{ kg/hr} \times 3 \times 10,680 \text{ kcal/kg} = 532,524 \text{ kW} \approx 1,853 \text{ kcal/KWh}$ .
- Top Right:** Notes section with 7 items: Plant Output (Gross), Plant Heat Rate (Gross), Fuel (Natural Gas), Ambient Air Temperature (32 °C), Relative Humidity (80%), Atmospheric Pressure (1,013 mmbar), and Units.
- Bottom Right:** Box indicating 'CORRECTED AS RUN ( 100 % )' and plant identification: 'PERUSAHAAN UMUM LISTRIK NEGARA GRESIK COMBINED CYCLE POWER PLANT'.
- Bottom Center:** Title 'HEAT BALANCE DIAGRAM - BLOCK 3 GASE (100%) - FUEL GAS'.
- Bottom Left:** Drawing and revision information: 'DWG. NO. PG-601-ARII -C', 'Rev.', 'APPROVED:', 'CHECKED:'.
- Main Diagram:** A complex flowchart showing the heat and mass balance for Block 3. It includes components like the No. 7 HRSG, HP and LP turbines, condenser, desalination unit, and various pumps and valves. Data points for temperature (T), pressure (P), and flow rate (G) are provided at numerous points throughout the system.

3-19

### ■ GROSS HEAT RATE CALCULATION • COMBINED CYCLE

$$\frac{30,798 \text{ kg/h} \times 3 \times 10,680 \text{ kcal/kg}}{532,524 \text{ kW}} = 1,853 \text{ kcal/KWh}$$

BYPASS TO  
 ATMOSPHERE  
 FOR SIMPLE

No.7 GAS TURB  
GENERATOR

NO. 7 HRSG

## NOTES

1. PLANT OUTPUT(GROSS)  
G/T : 113,097 KW x 3  
S/T : 193,234 KW  

---

BLOCK : 532,524 KW  
OUTPUT :
2. PLANT HEAT RATE(GROSS)  
- COMBINED CYCLE  
1853 Kcal/KWh
3. FUEL  
NATURAL GAS  
HHV: 10,680 Kcal/Kg
4. AMBIENT AIR TEMPERATURE  
32 °C
5. RELATIVE HUMIDITY  
80 %
6. ATMOSPHERIC PRESSURE  
1,013 mmbar
7. UNITS  
F = Nm<sup>3</sup>/hr    P = Kg/cm<sup>2</sup>abs  
G = Kg/hr    T = °C  
H = Kcal/Kg

CORRECTED AS RUN ( 100 %)

PERUSAHAAN UMUM LISTRIK NEGARA  
GRESIK COMBINED CYCLE POWER PLANT

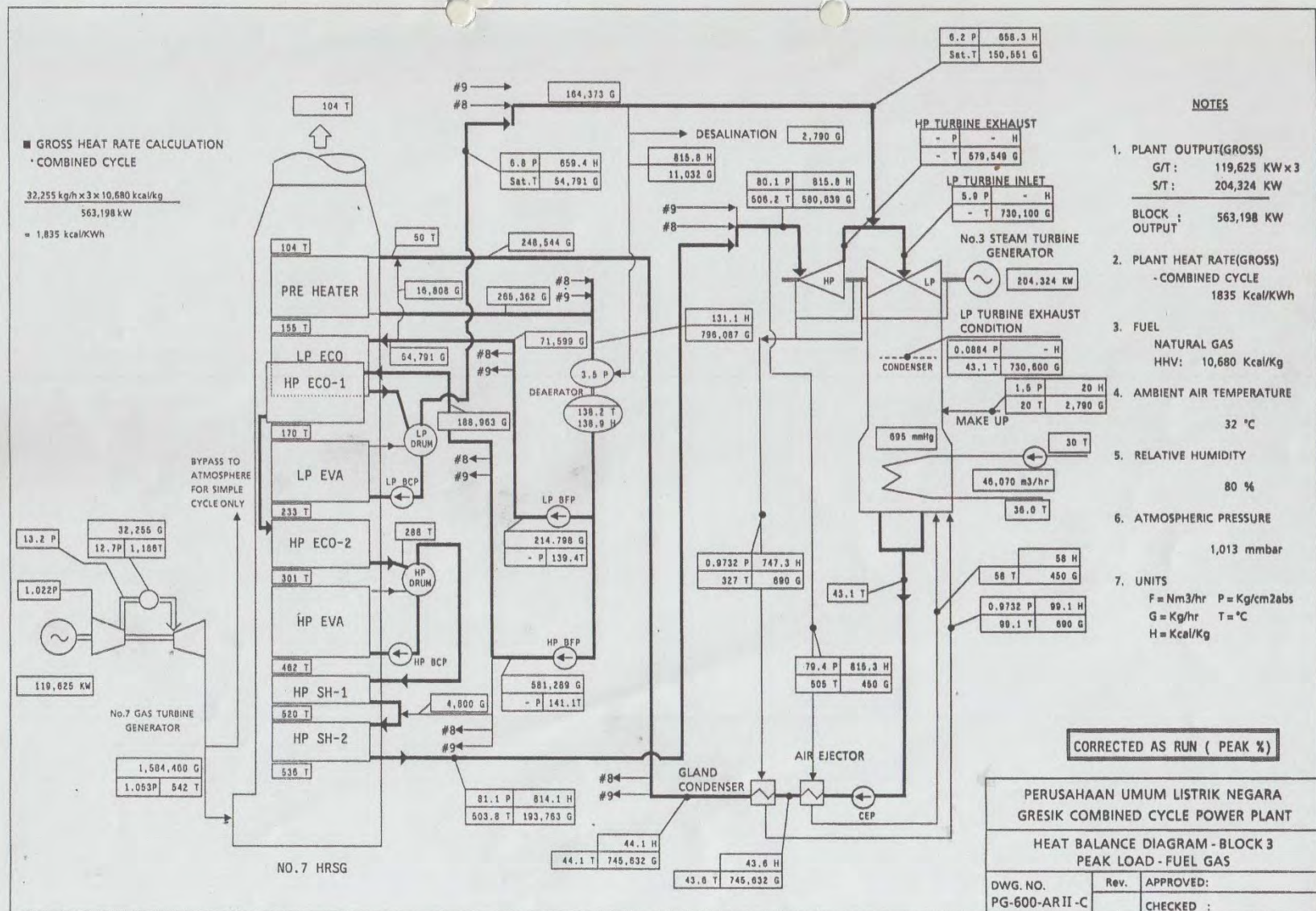
HEAT BALANCE DIAGRAM - BL  
GASE (100%) - FUEL GAS

DWG. NO.  
PG-601-ARII-C

|      |           |
|------|-----------|
| Rev. | APPROVED: |
|      | CHECKED   |



Lampiran 13 : Heat & Mass Balance Diagram pada PLTGU Beban Maksimal



## Lampiran 14 : Properties pada Berbagai Gas

| Gas                             | Formula                   | Molecular weight | Density - $\rho$ -                           |   |
|---------------------------------|---------------------------|------------------|--|---|
|                                 |                           |                  | ( $\text{kg/m}^3$ )                          | ( $\text{lb/ft}^3$ )                            |
| Acetylene (ethyne)              | $\text{C}_2\text{H}_2$    | 26               | 1.092 <sup>1)</sup><br>1.170 <sup>2)</sup>   | 0.0682 <sup>1)</sup><br>0.0729 <sup>2)</sup>    |
| Air                             |                           | 29               | 1.205 <sup>1)</sup><br>1.293 <sup>2)</sup>   | 0.0752 <sup>1)</sup><br>0.0806 <sup>2)</sup>    |
| Ammonia                         | $\text{NH}_3$             | 17.031           | 0.717 <sup>1)</sup><br>0.769 <sup>2)</sup>   | 0.0446 <sup>1)</sup><br>0.0480 <sup>2)</sup>    |
| Argon                           | $\text{Ar}$               | 39.948           | 1.661 <sup>1)</sup><br>1.7837 <sup>2)</sup>  | 0.1037 <sup>1)</sup><br>0.111353 <sup>2)</sup>  |
| Benzene                         | $\text{C}_6\text{H}_6$    | 78.11            | 3.486  | 0.20643   |
| Blast furnace gas               |                           |                  | 1.250 <sup>2)</sup>                          | 0.0780 <sup>2)</sup>                            |
| Butane                          | $\text{C}_4\text{H}_{10}$ | 58.1             | 2.489 <sup>1)</sup><br>2.5 <sup>2)</sup>     | 0.1554 <sup>1)</sup><br>0.156 <sup>2)</sup>     |
| Butylene (Butene)               | $\text{C}_4\text{H}_8$    | 56.11            | 2.504  | 0.148 <sup>2)</sup>                             |
| Carbon dioxide                  | $\text{CO}_2$             | 44.01            | 1.842 <sup>1)</sup><br>1.977 <sup>2)</sup>   | 0.1150 <sup>1)</sup><br>0.1234 <sup>2)</sup>    |
| Carbon disulphide               |                           | 76.13            |  |   |
| Carbureted Water Gas            |                           |                  |  | 0.048   |
| Chlorine                        | $\text{Cl}_2$             | 70.906           | 2.994 <sup>1)</sup>                          | 0.1869 <sup>1)</sup>                            |
| Coal gas                        |                           |                  | 0.58 <sup>2)</sup>                           |   |
| Coke Oven Gas                   |                           |                  |  | 0.034 <sup>2)</sup>                             |
| Combustion products             |                           |                  | 1.11 <sup>2)</sup>                           | 0.069 <sup>2)</sup>                             |
| Cyclohexane                     |                           | 84.16            |  |   |
| Digester Gas (Sewage or Biogas) |                           |                  |  | 0.062   |
| Ethane                          | $\text{C}_2\text{H}_6$    | 30.07            | 1.264 <sup>1)</sup>                          | 0.0789 <sup>1)</sup>                            |
| Ethyl Alcohol                   |                           | 46.07            |  |   |
| Ethyl Chloride                  |                           | 64.52            |  |   |
| Ethylene                        | $\text{C}_2\text{H}_4$    | 28.03            | 1.260 <sup>2)</sup>                          | 0.0786 <sup>2)</sup>                            |
| Helium                          | $\text{He}$               | 4.02             | 0.1664 <sup>1)</sup><br>0.1785 <sup>2)</sup> | 0.01039 <sup>1)</sup><br>0.011143 <sup>2)</sup> |
| N-Heptane                       |                           | 100.20           |  |   |
| Hexane                          |                           | 86.17            |  |   |
| Hydrogen                        | $\text{H}_2$              | 2.016            | 0.0899 <sup>2)</sup>                         | 0.0056 <sup>2)</sup>                            |
| Hydrochloric Acid               |                           | 36.47            | 1.63 <sup>2)</sup>                           |   |
| Hydrogen Chloride               | $\text{HCl}$              | 36.5             | 1.528 <sup>1)</sup>                          | 0.0954 <sup>1)</sup>                            |
| Hydrogen Sulfide                | $\text{H}_2\text{S}$      | 34.076           | 1.434 <sup>1)</sup>                          | 0.0895 <sup>1)</sup>                            |
| Krypton                         |                           |                  | 3.74 <sup>2)</sup>                           |   |
| Krypton                         |                           |                  | 3.74 <sup>2)</sup>                           |   |
| Methane                         | $\text{CH}_4$             | 16.043           | 0.658 <sup>1)</sup><br>0.717 <sup>2)</sup>   | 0.0417 <sup>1)</sup><br>0.0447 <sup>2)</sup>    |
| Methyl Alcohol                  |                           | 32.04            |  |   |
| Methyl Butane                   |                           | 72.15            |  |   |
| Methyl Chloride                 |                           | 50.49            |  |   |
| Natural gas                     |                           | 19.5             | 0.7 - 0.9 <sup>2)</sup>                      | 0.044 - 0.056 <sup>2)</sup>                     |
| Neon                            | $\text{Ne}$               | 20.179           | 0.8999 <sup>2)</sup>                         | 0.056179 <sup>2)</sup>                          |
| Nitric oxide                    | $\text{NO}$               | 30.0             | 1.249 <sup>1)</sup>                          | 0.0780 <sup>1)</sup>                            |
| Nitrogen                        | $\text{N}_2$              | 28.02            | 1.165 <sup>1)</sup><br>1.2506 <sup>2)</sup>  | 0.0727 <sup>1)</sup><br>0.078072 <sup>2)</sup>  |
| Nitrogen Dioxide                | $\text{NO}_2$             | 46.006           |  |   |
| N-Octane                        |                           | 114.22           |  |   |
| Nitrous Oxide                   | $\text{N}_2\text{O}$      | 44.013           |  | 0.114   |
| Nitrous Trioxide                | $\text{NO}_3$             | 62.005           |  |   |
| Oxygen                          | $\text{O}_2$              | 32               | 1.331 <sup>1)</sup><br>1.4290 <sup>2)</sup>  | 0.0831 <sup>1)</sup><br>0.089210 <sup>2)</sup>  |
| Ozone                           | $\text{O}_3$              | 48.0             | 2.14 <sup>2)</sup>                           | 0.125   |
| N-Pentane                       |                           | 72.15            |  |   |
| Iso-Pentane                     |                           | 72.15            |  |   |



## Lampiran 15 : Properties pada Berbagai Gas

| Gas or Vapor                     | Formula     | Specific Heat        |                      |                                     |                                     | Ratio of Specific Heats<br>$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ | Individual Gas constant<br>- R - |   |
|----------------------------------|-------------|----------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|----------------------------------|---|
|                                  |             | $c_p$<br>(KJ/(kg K)) | $c_v$<br>(KJ/(kg K)) | $c_p$<br>(Btu/(lb <sub>m</sub> °F)) | $c_v$<br>(Btu/(lb <sub>m</sub> °F)) |   | $c_p - c_v$<br>(KJ/(kg K))       | $c_p - c_v$<br>(ft lb/(lb <sub>m</sub> °R)) |
| Acetone                          |             | 1.47                 | 1.32                 | 0.35                                | 0.32                                | 1.11  | 0.15                             |   |
| Acetylene                        | $C_2H_2$    | 1.69                 | 1.37                 | 0.35                                | 0.27                                | 1.232   | 0.319                            | 59.34                                       |
| Air                              |             | 1.01                 | 0.718                | 0.24                                | 0.17                                | 1.40  | 0.287                            | 53.34                                       |
| Alcohol                          | $C_2H_5OH$  | 1.88                 | 1.67                 | 0.45                                | 0.4                                 | 1.13  | 0.22                             |   |
| Alcohol                          | $CH_3OH$    | 1.93                 | 1.53                 | 0.46                                | 0.37                                | 1.26  | 0.39                             |   |
| Ammonia                          | $NH_3$      | 2.19                 | 1.66                 | 0.52                                | 0.4                                 | 1.31  | 0.53                             | 96.5  |
| Argon                            | $Ar$        | 0.520                | 0.312                | 0.12                                | 0.07                                | 1.667   | 0.208                            |   |
| Benzene                          | $C_6H_6$    | 1.09                 | 0.99                 | 0.26                                | 0.24                                | 1.12  | 0.1                              |   |
| Blast furnace gas                |             | 1.03                 | 0.73                 | 0.25                                | 0.17                                | 1.41  | 0.3                              | 55.05                                       |
| Bromine                          |             | 0.25                 | 0.2                  | 0.06                                | 0.05                                | 1.28  | 0.05                             |   |
| Butadiene                        |             |                      |                      |                                     |                                     | 1.12  |                                  |   |
| Butane                           | $C_4H_{10}$ | 1.67                 | 1.53                 | 0.395                               | 0.356                               | 1.094   | 0.143                            | 26.5  |
| Carbon dioxide                   | $CO_2$      | 0.844                | 0.655                | 0.21                                | 0.16                                | 1.289   | 0.189                            | 38.86                                       |
| Carbon monoxide                  | $CO$        | 1.02                 | 0.72                 | 0.24                                | 0.17                                | 1.40  | 0.297                            | 55.14                                       |
| Carbon disulphide                |             | 0.67                 | 0.55                 | 0.16                                | 0.13                                | 1.21  | 0.12                             |   |
| Chlorine                         | $Cl_2$      | 0.48                 | 0.36                 | 0.12                                | 0.09                                | 1.34  | 0.12                             |   |
| Chloroform                       |             | 0.63                 | 0.55                 | 0.15                                | 0.13                                | 1.15  | 0.08                             |   |
| Coal gas                         |             | 2.14                 | 1.59                 |                                     |                                     |   |                                  |   |
| Combustion products              |             | 1                    |                      | 0.24                                |                                     |   |                                  |   |
| Ethane                           | $C_2H_6$    | 1.75                 | 1.48                 | 0.39                                | 0.32                                | 1.187   | 0.276                            | 51.5  |
| Ether                            |             | 2.01                 | 1.95                 | 0.48                                | 0.47                                | 1.03  | 0.06                             |   |
| Ethylene                         | $C_2H_4$    | 1.53                 | 1.23                 | 0.4                                 | 0.33                                | 1.240   | 0.296                            | 55.08                                       |
| Freon 22                         |             |                      |                      |                                     |                                     | 1.18  |                                  |   |
| Helium                           | $He$        | 5.19                 | 3.12                 | 1.25                                | 0.75                                | 1.667   | 2.08                             | 386.3                                       |
| Hexane                           |             |                      |                      |                                     |                                     | 1.06  |                                  |   |
| Hydrochloric acid                |             | 0.795                | 0.567                |                                     |                                     |   |                                  |   |
| Hydrogen                         | $H_2$       | 14.32                | 10.16                | 3.42                                | 2.43                                | 1.405   | 4.12                             | 765.9                                       |
| Hydrogen Chloride                | $HCl$       | 0.8                  | 0.57                 | 0.191                               | 0.135                               | 1.41  | 0.23                             | 42.4  |
| Hydrogen Sulfide                 | $H_2S$      |                      |                      | 0.243                               | 0.187                               | 1.32  |                                  | 45.2  |
| Hydroxyl                         | $OH$        | 1.76                 | 1.27                 |                                     |                                     | 1.384   | 0.489                            |   |
| Krypton                          |             | 0.25                 | 0.151                |                                     |                                     |   |                                  |   |
| Methane                          | $CH_4$      | 2.22                 | 1.70                 | 0.59                                | 0.45                                | 1.304   | 0.518                            | 96.4  |
| Methyl Chloride                  | $CH_3Cl$    |                      |                      | 0.240                               | 0.200                               | 1.20  |                                  | 30.6  |
| Natural Gas                      |             | 2.4                  | 1.85                 | 0.56                                | 0.44                                | 1.2   | 0.5                              | 79.1  |
| Neon                             |             | 1.03                 | 0.618                |                                     |                                     | 1.667   | 0.412                            |   |
| Nitric Oxide                     | $NO$        | 0.995                | 0.718                | 0.23                                | 0.17                                | 1.386   | 0.277                            |   |
| Nitrogen                         | $N_2$       | 1.04                 | 0.743                | 0.25                                | 0.18                                | 1.400   | 0.297                            | 54.99                                       |
| Nitrogen tetroxide               |             | 4.69                 | 4.6                  | 1.12                                | 1.1                                 | 1.02  | 0.09                             |   |
| Nitrous oxide                    | $N_2O$      | 0.88                 | 0.69                 | 0.21                                | 0.17                                | 1.27  | 0.18                             | 35.1  |
| Oxygen                           | $O_2$       | 0.919                | 0.659                | 0.22                                | 0.16                                | 1.395   | 0.260                            | 48.24                                       |
| Pentane                          |             |                      |                      |                                     |                                     | 1.07  |                                  |   |
| Propane                          | $C_3H_8$    | 1.67                 | 1.48                 | 0.39                                | 0.34                                | 1.127   | 0.189                            | 35.0  |
| Propene (propylene)              | $C_3H_6$    | 1.5                  | 1.31                 | 0.36                                | 0.31                                | 1.15  | 0.18                             | 36.8  |
| Water Vapor                      |             | 1.93                 | 1.46                 | 0.46                                | 0.35                                | 1.32  | 0.462                            |   |
| Steam 1 psia. 120 – 600 °F       |             |                      |                      |                                     |                                     |   |                                  |   |
| Steam 14.7 psia. 220 – 600 °F    |             | 1.97                 | 1.5                  | 0.47                                | 0.36                                | 1.31  | 0.46                             |   |
| Steam 150 psia. 360 – 600 °F     |             | 2.26                 | 1.76                 | 0.54                                | 0.42                                | 1.28  | 0.5                              |   |
| Sulfur dioxide (Sulphur dioxide) | $SO_2$      | 0.64                 | 0.51                 | 0.15                                | 0.12                                | 1.29  | 0.13                             | 24.1  |
| Xenon                            |             | 0.16                 | 0.097                |                                     |                                     |   |                                  |   |

## Lampiran 16 : Spesifikasi Turbin Gas PLTGU

### MITSUBISHI MW-701D GAS TURBINE SPECIFICATION



#### 1. Major Items for Gas Turbine Power Station

##### (1) Gas Turbine

|                      |   |
|----------------------|---|
| Type                 | : Open Simple Cycle Single Shaft<br>MW-701D   |
| Speed                | : 3,000 rpm   |
| Capacity             | : 144,000kw   |
| Design base          | ;   |
| Inlet Air Temp       | : 5 ° C   |
| Atmospheric Pressure | : 1,033 kg/cm3abs   |
| Relative Humidity    | : 60%   |
| Fuel                 | : Light Oil or City Gas<br>*Light Oil<br>Specific Gravity:0.83<br>HHV:10,800kcal/kg<br>*City Gas<br>Specific Gravity:0.847 (kg/m3N)<br>HHV:11,000kcal/kg                  |
| NOx Control          | : Water Injection + High Temp. Nox Denitration<br>NOx Limited Value<br>G/T Outlet :not more than 50ppm (at O2-16%)<br>Denitration Outlet :not more than 20ppm (at O2-16%) |

##### (2) Generator

|                    |  |
|--------------------|--|
| Type               | : Cylindrical Rotating Field Type Three Phase Synchronous Generator                |
| Rating Item:       |  |
| Apparent Output    | : 160,000KVA (at 5 ° C)  |
| Power Factor       | : 90%  |
| Relative Output    | : 144,000kw  |
| Terminal Voltage   | : 15,000V  |
| Frequency          | : 50Hz   |
| No. of Pole, Speed | : 2 pole, 3,000rpm   |
| Cooling Method     | : Open Air Cooling   |
| Insulation         | : Class F  |
| Excitor            | : Brushless Type using Silicon Rectifier and AC excitor Coupled with the Generator |

## Lampiran 16 : Spesifikasi Turbin Gas PLTGU (lanjutan)

- (3) Main Transformer : 160,000KVA, 14.7KV/66KV
- (4) Starting Method:
- Starting Device : Three-phase Induction Motor
  - Motor
  - Starting Motor : 1,450kw
  - Synchronous Speed : 1,500rpm
- (5) Starting Time : Within 57min. (including gas compressor)
- (6) Annual Operating Patern:
- Annual Utilization Factor : 10%
  - Starting : Everyday
- (7) Control : Operation and monitoring from local control panel or remote control panel

### 2. Major Items for Gas Turbine

- (1) Air Compressor
- Type : Axial Flow Reaction Type
  - Compression Ratio : approx.14
  - No. of Stages : 19
  - Inlet Guide vane : Variable
- (2) Combustor:
- Type : Cannular Type
  - Number : 18
  - Ignition Method : Electric Spark Method x 2
- (3) Turbine:
- Type : Axial Flow Reaction Type
  - No. of Stages : 4
  - Forced Air Cooled Blade : Stationary Blade 1, 2 Stage
  - : Moving Blade 1,2 Stage
  - Speed : 3,000rpm
  - Emergency Governor : Mechanical (ejector type) and Electrical



## Lampiran 16 : Spesifikasi Turbin Gas PLTGU (lanjutan)

### 3.Design Performance and Environmental Performance of the Type MW-701 D Gas Turbine:

Table 1. Guaranteed Output Capacity and Thermal Efficiency

| Ambient Temp. (° C)                      |  | 5   | 15             | 33   |
|--|--|-----|----------------|------|
| Generator Out-Put (MW)                   | Extent of mixed combustion of light oil and city gas | 144 | 136            | 121  |
| Thermal efficiency at Generator Terminal | 50 % mixed combustion of light oil and city gas      | --- | more than 29.9 | ---- |

(note 1) Atmospheric Pressure :1.033ata Relative Humidity: 60%

(note 2) Fuel Characteristics :according to"Chapter 1,Section 4, Design Criteria"

(note 3) Light Oil : HHV/LHV=1.062

City Gas : HHV/LHV=1.104

#### (2)Auxiliary Power Ratio:

50% mixed combustion of light oil and city gas at 15 ° C

Auxiliary Power Ratio at the Power Station : less than 3%

#### (3) Environmental Performance:

NO<sub>x</sub> , SO<sub>x</sub> and Dust at the outlet of chimney:

Table 2: Environmental Performance

| Item            | Emission Density  | Emission Volume | Remarks   |
|-----------------|-------------------|-----------------|---|
| NO <sub>x</sub> | G/T Outlet        | 50ppm           | 80m3N/h   |
|                 | Denitration Outle | 20ppm           | 32m3N/h   |
|                 |                   |                 | equivalent at 16%O2                                 |
|                 |                   |                 | equivalent at16%O2 and less than 10ppm leak ammonia |
| SO <sub>x</sub> | 29ppm             | 37m3N/h         |   |
| Dust            | 5mg/m3N           | 8kg/h           | equivalent at 16%O2                                 |

### 4.History of Inspection:

(1) Commencement of Operation : July,1992

#### (2) Official Inspection;

1st Official Inspection :April,1993

2nd --- " ---- : May,1995

3rd --- " ---- : March,1998

#### (3) Measure Overhaul:

To change G/T 1st Stage Stationary Blade (27pcs out of 60pcs)

: 1995

(4) Measure Accident: None



**Lampiran 17 :** Layout Turbin Gas Mitsubishi MW 701D pada PLTGU UP Gresik

